

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Master en Ingeniería de Telecomunicación

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Autor: Portalea Galeano, Rodrigo Ezequiel

Tutor: Juan Córcoles Ortega

Co-Tutor: David Guerra Pereda

FECHA: Septiembre, 2020

CARACTERIZACIÓN COMPUTACIONAL DE LA POTENCIA ELECTROMAGNÉTICA ABSORBIDA EN EL CUERPO HUMANO A FRECUENCIAS DEL SISTEMA 5G

AUTOR: Rodrigo Ezequiel Portalea Galeano

TUTOR: Juan Córcoles Ortega

CO-TUTOR: David Guerra Pereda

**Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)
Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones (TEC)
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Septiembre de 2020**

Resumen

En el presente proyecto se ha realizado un estudio sobre la contribución a la exposición electromagnética de los seres humanos debida a la contaminación radioeléctrica procedente de la tecnología 5G, concretamente, en las bandas en las cuales procede a trabajar en España.

El objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es doble, por un lado, se busca conocer hasta qué punto es o no nociva la tecnología 5G en sus bandas de trabajo por comparativa con los valores límite de exposición recomendados. Por otra parte, se busca ofrecer un modelo de capas del cuerpo humano para determinar de manera cuantitativa en qué zona corporal se disipa la mayor parte de la potencia procedente de esa tecnología.

Inicialmente, se procede al diseño y simulación de una antena en tecnología microstrip. Seguidamente, comprobado el buen diseño de la antena, a través de *CST MicroWave Studio* se analiza si los niveles de señal empleados por la tecnología 5G en régimen de funcionamiento se encuentran por debajo de los niveles de referencia que aseguran la ausencia de efectos nocivos sobre la salud.

Posteriormente, se realiza modelo de capas que se compone de: piel, grasa, músculo y hueso. El primer estudio será realizado con la base de datos perteneciente a IT'IS FOUNDATION. Seguidamente se estudiará el mismo modelo, pero comparándolo con otros estudios para poder disponer de esta manera mayor asertividad.

Para ello se ha llevado a cabo una campaña de simulaciones computacionales en la cual se ha procedido, primeramente, al estudio del campo eléctrico total existente en las diferentes capas del cuerpo humano. Estudiado esto, se ha generado un modelo nuevo de capas más detallado para obtener con mayor exactitud en qué zona del cuerpo humano se disipa la misma.

Finalmente, se consigue observar la disminución en función a la distancia de figuras de mérito como la SAR, y la densidad de potencia. Pudiendo a determinadas frecuencias de estudio centrarse únicamente en esta última disipándose su totalidad en la piel, más concretamente en la epidermis.

Palabras Clave

5G, Exposición Electromagnética Humana, Contaminación Radioeléctrica, Onda Plana

Abstract

In this project a study has been carried out on the contribution to the electromagnetic exposure of humans due to radio pollution from 5G technology, specifically in the bands in which it proceeds to work in Spain.

The objective of this Master's Final Project is twofold. On the one hand, it seeks to know to what extent 5G technology is or is not harmful in its working bands by comparison with the recommended exposure limit values. On the other hand, it seeks to offer a model of the layers of the human body in order to determine in a quantitative way in which area of the body most of the power coming from this technology is dissipated.

Initially, we proceed to design and simulate an antenna in microstrip technology. Then, once the antenna design has been verified, CST MicroWave Studio analyzes whether the signal levels used by 5G technology in operation are below the reference levels that ensure the absence of harmful effects on health.

Subsequently, a model of layers is made, consisting of: skin, fat, muscle and bone. The first study will be conducted with the database belonging to IT'IS FOUNDATION. Then the same model will be studied, but comparing it with other studies in order to have a greater assertiveness.

For this purpose, a campaign of computer simulations has been carried out in which, firstly, the total electric field existing in the different layers of the human body has been studied. Once this has been studied, a new more detailed model of layers has been generated to obtain with greater accuracy in which area of the human body it dissipates.

Finally, it is possible to observe the decrease in function to the distance of figures of merit as the SAR, and the power density. At certain frequencies, the study can focus only on the latter, dissipating entirely in the skin, more specifically in the epidermis.

Key Words

5G, Human Electromagnetic Exposure, Radio Electric Pollution, Plane Wave

Agradecimientos

Doy mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que a pesar de las diferentes dificultades encontradas a lo largo de mi carrera, incluyendo en ella el presente documento, siempre me han apoyado y han encontrado las palabras para que pueda seguir adelante.

Desde luego este trabajo me ofrecerá el camino a conseguir uno de mis mayores logros en la vida, y gran parte de ello se lo debo a mis padres. Esas personas que a pesar de la distancia y las dificultades han confiado en mí de manera incondicional y han navegado a mi lado para poder brindarme un futuro mejor.

Sin duda y no menos importante, no puedo dejar sin nombrar a Marlene Soledad, mi querida hermana. No importa los kilómetros que nos distancien ni las dificultades encontradas de por medio, siempre nos hemos apoyado, tanto que este trabajo también tiene una pequeña esencia tuya.

Otra persona a la que no puedo no nombrar se llama Jone Ibarzabal, mi pareja. Cada día desde que empecé este viaje has estado dándome ánimos. Yo ahora acabo este viaje, pero tú lo empiezas, desde luego no lo harás sola.

Este pequeño párrafo va dedicado a mis amigos (Paul, Alicia, Olga, ...), gracias por sacarme de casa en los momentos que más lo he necesitado y brindarme muchas tardes con risas y paseos. Agradezco mucho vuestro apoyo. En especial a Olga, a pesar del cansancio del día a día siempre sacas una sonrisa que alegra los días. Paul, ese amigo que es mi hermano de otra sangre y Alicia mi gran compañera de paseos madrileños.

Finalmente, mis tutores. Por un lado, Juan Córcoles, muchas gracias por aceptar ser uno de mis directores del trabajo sin siquiera conocerme y guiarme poco a poco para poder hacer un sueño posible. Por otro lado, David Guerra, en su día agradecí tu apoyo para la realización del Trabajo Fin de Grado en el cual me guiaste hacía el éxito. Hoy, agradezco parte de tu ayuda hacia otro éxito. Con el tiempo, no solo te convertiste en una persona a la que agradecer, sino en algo más importante, un amigo.

En especial, dedico este trabajo a mi madre, tras un año tan duro como el que has tenido, eres la persona de la que más me enorgullezco tener en mi camino. La mayor luchadora que conozco.

¡FELICIDADES!

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN.....	- 1 -
1.1 MOTIVACIÓN	- 1 -
1.2 OBJETIVOS.....	- 2 -
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	- 3 -
2 ESTADO DEL ARTE	- 5 -
2.1 INTRODUCCIÓN.....	- 5 -
2.2 BEAMFORMING Y MIMO MASIVO.....	- 6 -
2.2.1 Antenas MIMO (Integración en equipo de usuario).....	- 8 -
2.3 GESTIÓN DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO.....	- 9 -
2.4 CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y EFECTOS BIOLÓGICOS	- 10 -
2.5 CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN ONDAS EN ALTA FRECUENCIA	- 15 -
3 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN DE ANTENA Y MODELO REALISTA	- 18 -
3.1 INTRODUCCIÓN.....	- 18 -
3.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN	- 18 -
3.3 DISEÑO DE ANTENA CON TECNOLOGÍA MICROSTRIP	- 20 -
3.4 SAR-SPECIFIC ABSORPTION RATE	- 25 -
3.4.1 Resultados de SAR a 23 dBm.....	- 25 -
3.4.2 Resultados de SAR a 26 dBm.....	- 27 -
3.5 LOW-POWER EXCLUSION LEVEL.....	- 30 -
3.6 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	- 32 -
4 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE EL MODELO DE INCIDENCIA DE ONDA PLANA.....	- 35 -
4.1 INTRODUCCIÓN.....	- 35 -
4.2 DESCRIPCIÓN TEÓRICA DEL MODELO DE INCIDENCIA DE ONDA PLANA	- 35 -
4.3 CARACTERIZACIÓN DE POTENCIAS ABSORBIDAS EN TEJIDOS HUMANOS MEDIANTE EL MODELO DE INCIDENCIA DE ONDA PLANA	- 39 -
4.3.1 Escenario 1	- 39 -
4.3.2 Escenario 2	- 40 -
4.3.3 Escenario 3	- 41 -
4.3.4 Escenario 4	- 42 -
4.3.5 Discusión de resultados.....	- 43 -
4.4 RESULTADOS A 3.7 Y 26 GHz	- 44 -
4.4.1 Análisis a 3.7 GHz.....	- 44 -
4.4.2 Análisis a 26 GHz.....	- 45 -
4.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	- 46 -
4.6 CARACTERIZACIÓN DE POTENCIA DE LA CAPA PIEL.....	- 46 -
4.6.1 Hipótesis de estudio	- 46 -
4.6.2 Análisis de la Piel.....	- 47 -
4.6.3 Discusión de resultados.....	- 49 -
5 CONCLUSIONES	- 52 -
REFERENCIAS	- 54 -
GLOSARIO	- 59 -

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1. EVOLUCIÓN DE LAS REDES MÓVILES [6], [7].....	- 5 -
FIGURA 2-2. IMT-AVANZADAS VS. IMT-2020 [8]	- 5 -
FIGURA 2-3. BEAMFORMING DE HAZ (4G VS. 5G) [10]	- 6 -
FIGURA 2-4. BEAMFORMING Y MIMO MASIVO [11].	- 7 -
FIGURA 2-5. ANTENA MIMO EN LA BANDA DE 3.4-3.8 GHz.....	- 8 -
FIGURA 2-6. A) COEFICIENTE DE REFLEXIÓN. B) GANANCIA DIRECTIVA.	- 8 -
FIGURA 2-7: SISTEMA DE MEDIDA SAR [25], [26]	- 13 -
FIGURA 2-8. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN ARRAY PARCHE 2x2, (A) 28 GHz, (B) 40 GHz, (C) 60 GHz [27].	- 15 -
FIGURA 2-9. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS TEJIDOS, (A) MODELO CILÍNDRICO CON ANTENA, (B) MODELO DE CAPA ÚNICA, (C) MODELO MULTICAPA [27].	- 15 -
FIGURA 3-1. MODELO DE CABEZA. A) CAPA INTERIOR. B) CAPA EXTERIOR.	- 18 -
FIGURA 3-2. MODELO DE CABEZA. A) JUNTO A ANTENA MICROSTRIP. B) JUNTO A DIPOLO.	- 19 -
FIGURA 3-3. ANTENA MICROSTRIP TIPO A DISEÑAR [32].	- 22 -
FIGURA 3-4. RESISTENCIA DE ENTRADA NORMALIZADA [32].	- 22 -
FIGURA 3-5. ANTENA DE PARCHE A 3.7 GHz.	- 23 -
FIGURA 3-6. DIAGRAMA DE RADIACIÓN EN 3D.	- 23 -
FIGURA 3-7. PARÁMETRO S_{11} (DB).	- 24 -
FIGURA 3-8. GANANCIA DIRECTIVA (DBI).	- 24 -
FIGURA 3-9. DISTRIBUCIÓN DE SAR CON DIPOLO ELEMENTAL EN 3.7 GHz.	- 25 -
FIGURA 3-10. DISTRIBUCIÓN DE SAR CON ANTENA MICROSTRIP EN 3.7 GHz.	- 26 -
FIGURA 3-11. DISTRIBUCIÓN DE SAR CON DIPOLO ELEMENTAL EN 3.7 GHz.	- 27 -
FIGURA 3-12. DISTRIBUCIÓN DE SAR CON ANTENA MICROSTRIP EN 3.7 GHz.	- 28 -
FIGURA 3-13. SAR VS. DISTANCIA	- 29 -
FIGURA 3-14. RESTRICCIÓN DE LONGITUD DE ONDA (A) MÁS CORTA.	- 33 -
FIGURA 4-1. PERMITIVIDADES Y CONDUCTIVIDADES DE LAS DISTINTAS CAPAS ANALIZADAS: A) PIEL, B) GRASA, C) MÚSCULO, D) HUESO.....	- 37 -
FIGURA 4-2. DISTRIBUCIÓN DE CAPAS A ANALIZAR.	- 38 -
FIGURA 4-3. DENSIDAD DE POTENCIA VS. DISTANCIA A 3.5 GHz ESCENARIO 1.....	- 39 -
FIGURA 4-4. ESCENARIO 2.	- 40 -
FIGURA 4-5. POTENCIA VS. DISTANCIA A 3.5GHz ESCENARIO 2	- 40 -
FIGURA 4-6. ESCENARIO 3.	- 41 -
FIGURA 4-7. POTENCIA VS. DISTANCIA A 3.5GHz ESCENARIO 3	- 41 -
FIGURA 4-8. ESCENARIO 3.	- 42 -
FIGURA 4-9. POTENCIA VS. DISTANCIA A 3.5GHz ESCENARIO 4	- 42 -
FIGURA 4-10. ESCENARIO 1 A 3.7 GHz.	- 44 -
FIGURA 4-11. POTENCIA VS. DISTANCIA A 3.7GHz	- 44 -
FIGURA 4-12. ESCENARIO 2 A 26 GHz.....	- 45 -
FIGURA 4-13. POTENCIA VS. DISTANCIA A 26 GHz.....	- 45 -
FIGURA 4-14. ESTRUCTURA GENERAL DE LA PIEL HUMANA [40].	- 46 -
FIGURA 4-15. ANÁLISIS DE LA PIEL.....	- 47 -
FIGURA 4-16. POTENCIA VS. DISTANCIA EN LA CAPA PIEL A 3.5 GHz.....	- 48 -
FIGURA 4-17. POTENCIA VS. DISTANCIA EN LA CAPA PIEL A 3.7 GHz.....	- 48 -
FIGURA 4-18. POTENCIA VS. DISTANCIA EN LA CAPA PIEL A 26 GHz.....	- 49 -
FIGURA 4-19. ANÁLISIS DE LA PIEL.....	- 50 -
FIGURA 4-20. POTENCIA VS. DISTANCIA EN LA CAPA PIEL A 26 GHz.....	- 50 -

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1: ESTADO DE LAS PRINCIPALES BANDAS DE FRECUENCIA 5G EN ESPAÑA.....	- 9 -
TABLA 2-2. NIVELES DE REFERENCIA DE EXPOSICIÓN DE CUERPO ENTERO Y EXPOSICIÓN LOCAL. ^A	- 13 -
TABLA 2-3. NIVELES DE REFERENCIA DE EXPOSICIÓN DE CUERPO ENTERO Y EXPOSICIÓN LOCAL.	- 14 -
TABLA 2-4. PROPIEDADES DIELECTRICAS DEL CUERPO HUMANO [27].....	- 16 -
TABLA 2-5. DATOS FINALES DEL ESTUDIO DE HAMED EN EL MODELO CAPA ÚNICA [27].	- 16 -
TABLA 2-6. DATOS FINALES DEL ESTUDIO DE HAMED EN EL MODELO CAPA TRIPLE [27].	- 16 -
TABLA 3-1. DATOS DEL MODELO DE CABEZA ANTROPOMÓRFICO A 3.7GHZ.....	- 19 -
TABLA 3-2. PARÁMETROS PRINCIPALES DE DISEÑO DE LA ANTENA MICROSTRIP.	- 20 -
TABLA 3-3. DATOS DE LA ANTENA MICROSTRIP	- 23 -
TABLA 3-4. SAR MÁXIMO OBSERVADO A 3.7 GHz.	- 32 -
TABLA 4-1. DISIPACIÓN DE POTENCIA EN LAS CAPAS (ESCENARIO 1).....	- 39 -
TABLA 4-2. DISIPACIÓN DE POTENCIA EN LAS CAPAS (ESCENARIO 2).....	- 40 -
TABLA 4-3. DISIPACIÓN DE POTENCIA EN LAS CAPAS (ESCENARIO 3).....	- 41 -
TABLA 4-4. DISIPACIÓN DE POTENCIA EN LAS CAPAS (ESCENARIO 4).....	- 42 -
TABLA 4-5. DISIPACIÓN MEDIA DE POTENCIA VS DISIPACIÓN DE POTENCIA EN ESCENARIOS 1 A 3.5 GHz.....	- 43 -
TABLA 4-6. DISIPACIÓN DE POTENCIA EN LAS CAPAS A 3.7 GHz	- 44 -
TABLA 4-7. DISIPACIÓN DE POTENCIA EN LAS CAPAS A 26 GHz	- 45 -

1 Introducción

1.1 Motivación

El crecimiento continuo de la demanda hacia mejores experiencias de banda ancha móvil está inspirando a la industria a mirar hacia adelante sobre cómo se pueden aprovechar las redes para satisfacer las futuras demandas de capacidad extrema y rendimiento. En la actualidad, la quinta generación (5G) es el conjunto de componentes técnicos necesarios para manejar estos requisitos. El conjunto de *releases* de 5G enfatiza el desarrollo de técnicas existentes para mejorar la capacidad, combinado con la evolución de la tecnología de la interfaz radio.

El acceso inalámbrico futuro se extenderá más allá de las personas y admitirá la conectividad para cualquier elemento que pueda beneficiarse de estar conectado. Uno de los motivadores claves para 5G es proporcionar cobertura de banda ancha inalámbrica ubicua, de alta velocidad y alta calidad para satisfacer las necesidades sociales e industriales más allá de 2020.

Ante la inquietud social existente por las radiaciones electromagnéticas a lo largo de la evolución de estas tecnologías, en 1996 la Organización Mundial de la Salud (OMS) constituyó el denominado Proyecto Internacional de Campos Electromagnéticos (CEM) para evaluar con datos científicos los posibles riesgos sobre la salud motivados por los CEM de radiofrecuencia (RF). Existen estudios que aseguran que el uso de teléfonos móviles no provoca riesgos en la salud [1]. Sin embargo, la aparición de 5G, una tecnología que operan en otros rangos de frecuencias y con características innovadoras en lo que a la forma de emitir se refiere, hace necesaria una actualización del análisis de la exposición a CEM.

La normativa define un conjunto de criterios para verificar la ausencia de los efectos nocivos sobre la salud que se han demostrado mediante evidencia científica. Estos criterios se especifican por medio de dos tipos de valores límite [2]:

- **Restricciones básicas:** Según la frecuencia, se expresan en términos de inducción magnética (μT), densidad de corriente (A/m^2), densidad de potencia (W/m^2) o tasa de absorción específica (“*Specific Absorption Rate*” - SAR) (W/kg). Estas magnitudes, en las bandas de RF, hacen referencia directa a los efectos térmicos que se pueden observar en los tejidos orgánicos, pero son difíciles de medir.
- **Niveles de referencia:** A efectos prácticos, y para facilitar las mediciones, se dan niveles de intensidad de campo eléctrico (V/m) o magnético (A/m), inducción magnética (T) o densidad de flujo de potencia (W), que son magnitudes sencillas de medir en el aire mediante antenas, analizadores y la metodología adecuada.

El cumplimiento de los niveles de referencia garantiza el de las restricciones básicas y no deberán ser sobrepasados.

Como se ha comentado anteriormente, en la actualidad nos encontramos ante la quinta generación (5G) de telefonía móvil. Dicha tecnología utiliza bandas de frecuencias “nuevas” en lo que a comunicación móvil se refiere. Por tanto, existe un desconocimiento social en cuanto a exposición electromagnética referente a dicha tecnología.

En este contexto, el presente Trabajo Fin de Máster tiene como punto de partida el Trabajo Fin de Grado desarrollado por el mismo autor, en el cual se realizó un estudio semejante referente al sistema Bluetooth [3].

1.2 Objetivos

El estudio realizado se centra en el análisis de la exposición electromagnética debida a la tecnología 5G, en las bandas de frecuencias asignadas a dicha tecnología en España. El objetivo es, por tanto, cuantificar a través de simulaciones los niveles de exposición electromagnéticos a los que los tejidos de los seres humanos se encontrarían expuestos debido a esta tecnología.

Primeramente, se propone un estudio de exposición electromagnética a través de un modelo realista perteneciente a un software comercial, realizando especial hincapié en valores de SAR, para a continuación cuantificar a través de los niveles observados el denominado *low-power exclusion level*.

Seguidamente, se realiza un estudio de cálculo de potencias en campo lejano [4], [5]. Dicho estudio, se realiza en base a simulaciones en las cuales se incluyen las diferentes capas existentes en el cuerpo humano: piel, grasa, músculo y hueso.

El objetivo por tanto es doble, por un lado, analizar la cantidad de potencia existente en la superficie de cada capa de las anteriormente nombradas y observar el porcentaje de potencia disipada entre ellas. Por otro lado, ser capaz de analizar con mayor asertividad en qué capa se pierde mayor potencia para desarrollar un modelo más realista de la misma de cara a una segunda iteración de simulaciones.

Finalmente poder comparar todos estos resultados conseguidos con los que se puedan llegarse a obtener a través de un software comercial.

1.3 Organización de la memoria

En el Capítulo 1 – Introducción, se describe la motivación que ha llevado a cabo la realización del presente Trabajo Fin de Máster comentando los objetivos a lograr.

Seguidamente, en el Capítulo 2 – Estado del Arte, se ofrece una visión de la evolución de la telefonía móvil hasta la futura 5G haciendo llegar al lector los retos a los que esta última hará frente. A continuación, el capítulo explica en qué zona del espectro se encontrará dicha tecnología y las medidas de seguridad existente en cuanto a niveles de exposición electromagnética que se han de cumplir. Finalmente, se hace referencia a determinados estudios sobre exposición electromagnética.

En el Capítulo 3, se presenta un modelo de Caracterización mediante simulación de antena y modelo realista. Para ello, se tienen en cuenta determinadas consideraciones previas tomadas para el diseño de la antena en tecnología microstrip. A continuación, se hace referencia a las ecuaciones utilizadas para el diseño de la misma. Consiguiente a esto, se realiza un análisis de exposición electromagnética en 3.7 GHz ante un modelo de cabeza perteneciente a *CST MicroWave Studio*, para a través de dichos valores comprobar el *low power exclusion level* existente a dicha frecuencia.

A continuación, en el Capítulo 4 se presenta un modelo de Caracterización mediante el modelo de incidencia de onda plana a través de diferentes simulaciones en diversos modelos de capas que simulan la distribución de las diferentes capas existentes en el cuerpo humano se realiza un estudio de la densidad de potencia existente.

Finalmente, en el Capítulo 5 se desarrollan las Conclusiones que han sido logradas a lo largo del presente trabajo.

2 Estado del Arte

2.1 Introducción

Las comunicaciones inalámbricas pertenecen a una de las secciones de mayor crecimiento en la industria de las comunicaciones. Los sistemas de comunicaciones móviles han experimentado múltiples cambios a lo largo del tiempo, desde comunicaciones totalmente analógicas a comunicaciones completamente digitales.

5G es la nueva red móvil, un nuevo estándar inalámbrico del cual se espera conseguir una sociedad hiperconectada, en la que no únicamente las personas se encuentren conectadas a la red, sino también una multitud de dispositivos, creando y consiguiendo de esta manera el llamado IoT (Internet of Things).

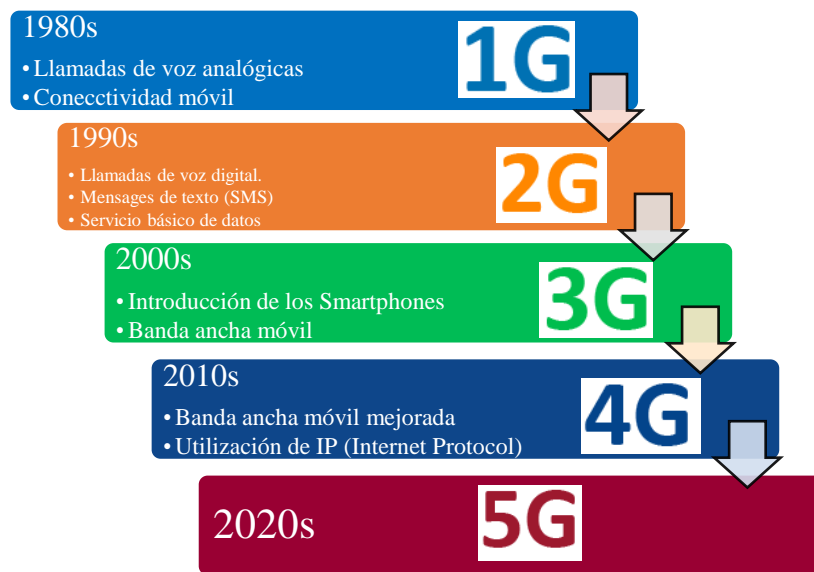


Figura 2-1. Evolución de las redes móviles [6], [7]

Se conoce con el acrónimo 5G, a la quinta generación de telefonía móvil. Se trata de un sistema de comunicación inalámbrica de datos formado por varios estándares, que utilizan los dispositivos móviles para poder realizar una conexión a la red en cualquier localización en la que se encuentren sus usuarios.

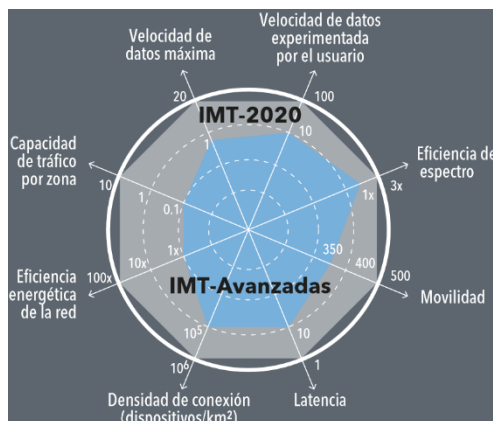


Figura 2-2. IMT-Avanzadas vs. IMT-2020 [8]

La tecnología 5G se encuentra impulsada principalmente por ocho requisitos [9]:

- Una tasa de datos de hasta 10Gbps.
- Latencia máxima de 1 milisegundo.
- Una banda ancha 1000 veces más rápida por unidad de área.
- Hasta 100 dispositivos más conectados por unidad de área (en comparación con las redes 4G/LTE).
- Disponibilidad del 99.999% del tiempo 5 minutos de indisponibilidad anual.
- Cobertura del 100%.
- Reducción del 90% en el consumo de energía de la red.
- Hasta 10 diez años de duración de la batería en los dispositivos IoT baja potencia.

Por tanto, la tecnología 5G será el componente tecnológico esencial en la transformación digital tanto en la sociedad como en la economía.

2.2 Beamforming y MIMO Masivo

Hasta hoy día, las estaciones base se encontraban transmitiendo información a los usuarios en diversas direcciones “sin tener en cuenta” la ubicación de los mismos.

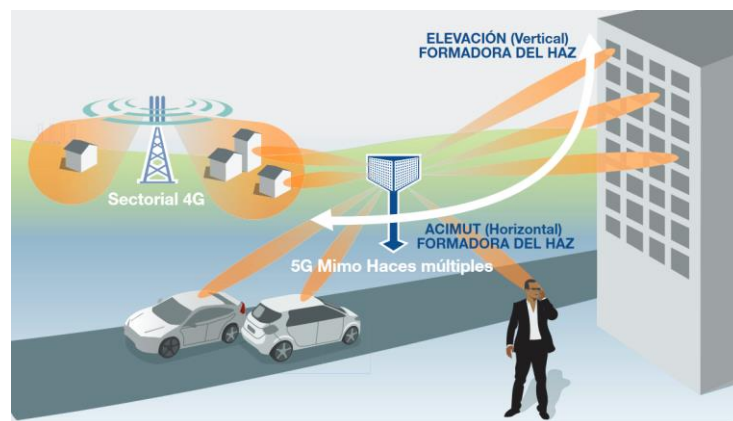


Figura 2-3. Beamforming de haz (4G vs. 5G) [10]

Debido a esto, poco a poco se ha ido incorporando la tecnología de antenas MIMO (Multiple- Input, Multiple-Output). Estas antenas se encuentran conformadas por múltiples sub-antenas pequeñas que se encuentran unidas, es decir, un array de antenas.

Varios transceptores transmiten por antenas separadas y canales de propagación no correlacionados para obtener un mayor rendimiento que beneficia a un único o a varios usuarios (multiplexación espacial), o bien la misma señal de salida se envía a través de varias antenas que se suman en el receptor para mejorar la calidad de la señal (diversidad RX) [11].

El elevado número de elementos de antena en los sistemas de MIMO Masivo permite combinar ambos objetivos. Cuando un sistema de antenas ofrece tanto formación de haz como multiplexación espacial, se denomina sistema de MIMO Masivo [11].

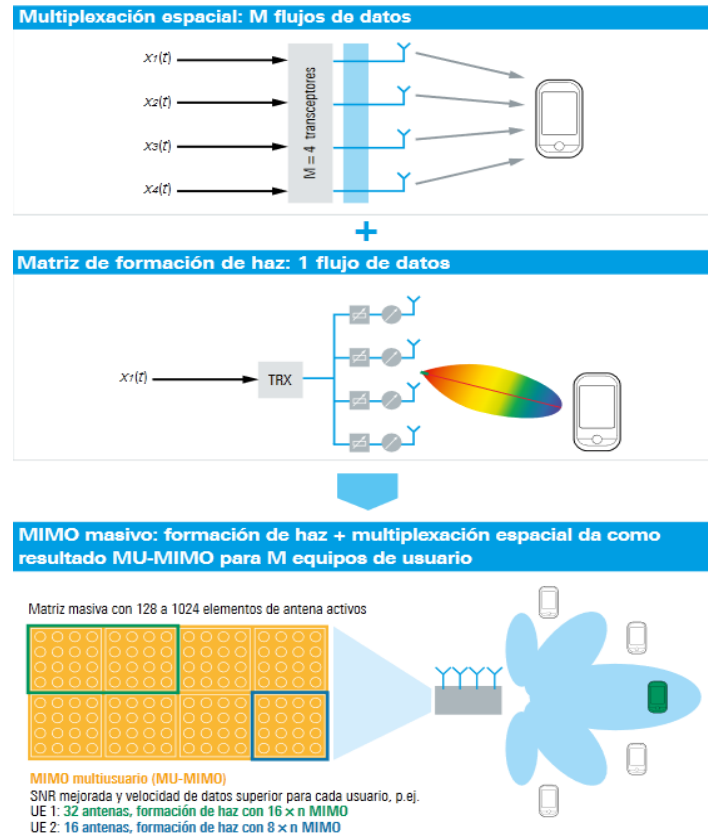


Figura 2-4. Beamforming y MIMO Masivo [11].

Gracias a determinados algoritmos de procesamiento de señal se puede conseguir determinar la dirección de transmisión y conseguir de manera simultánea el envío de información de manera individual [12]. En otras palabras, se consigue compensar hasta cierto punto las mayores pérdidas de espacio libre que se tienen en la banda de 3.7 GHz respecto a las frecuencias de 800 MHz de 4G, sin necesidad de aumentar la potencia del transmisor.

2.2.1 Antenas MIMO (Integración en equipo de usuario)

En la Figura 2-5 se representa el diseño de una antena de 4 elementos en tecnología MIMO [13] para su integración en dispositivos móviles. El sistema se implementa a través de tecnología microstrip line.

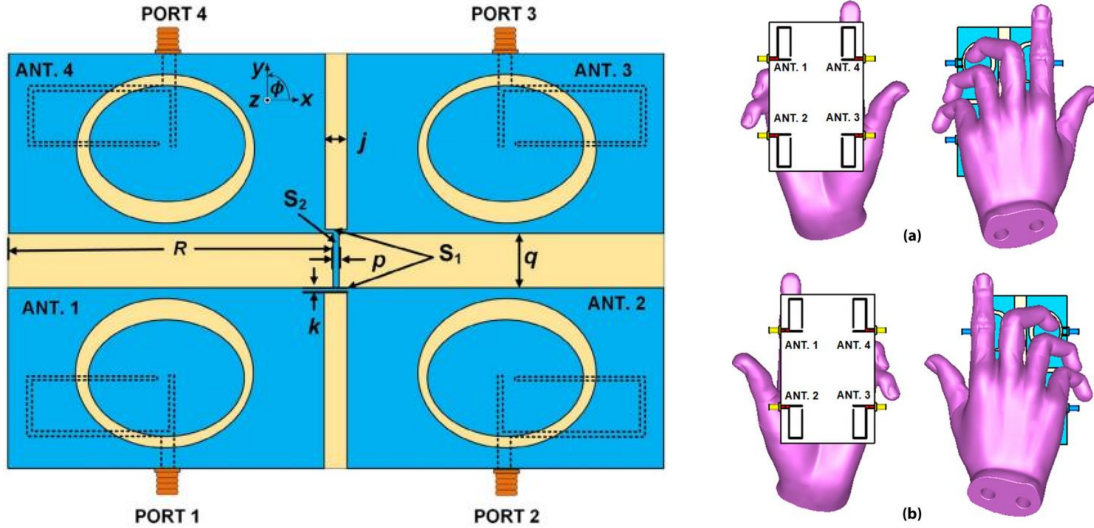


Figura 2-5. Antena MIMO en la banda de 3.4-3.8 GHz.

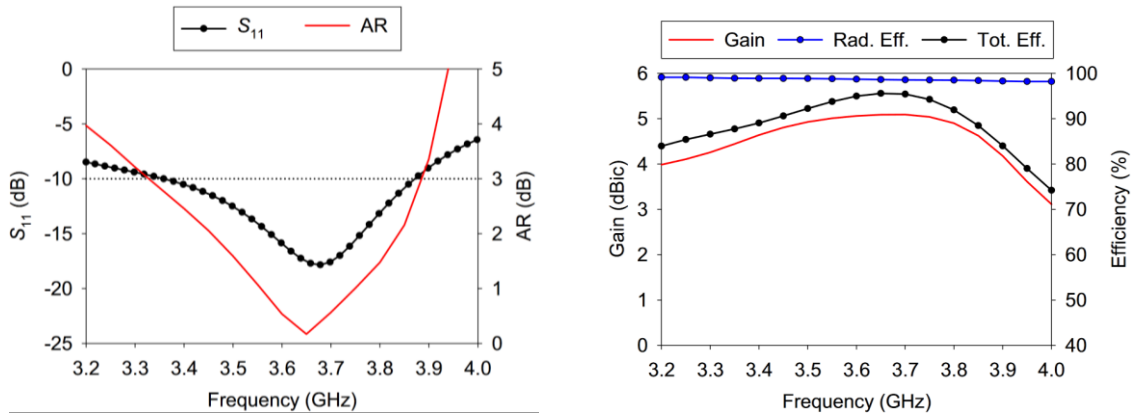


Figura 2-6. A) Coeficiente de reflexión. B) Ganancia directiva.

Podemos observar que en la antena diseñada las menores reflexiones ocurren cerca de la frecuencia de 3.7 GHz en la banda de 3.4-3.8 GHz. Por un lado, también se hace referencia a la relación axial (indica la polarización existente) la cual viene dada por:

$$AR = \frac{E_y}{E_x} \quad \text{Ecuación 1}$$

Por otro lado, se hacen referencia a la eficiencia radiada y a la eficiencia total de la antena. En [13] la eficiencia radiada hace referencia a la relación existente entre la potencia radiada y la potencia entregada a la antena, mientras que la eficiencia total incluye las pérdidas existentes debidas a los puertos de la antena.

2.3 Gestión del espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico a utilizar por parte de los servicios destinados a la tecnología 5G se acuerda en Conferencias Mundiales de Radiocomunicación de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones).

El llamado Radio Spectrum Policy Group (RSPG), a fecha 09 de noviembre del año 2016 [14] aprobó las bandas de frecuencias identificadas para los primeros usos (lanzamientos) de 5G en la Unión Europea. Dichas bandas, fueron nuevamente verificadas dos años después por la RSPG [15].

La situación en España de las bandas de frecuencias definidas para su uso dentro de los servicios 5G se resume en la siguiente tabla (Plan Nacional 5G 2018-2020) [16]:

Tabla 2-1: Estado de las principales bandas de frecuencia 5G en España.

Bandas de frecuencia		Situación en territorio nacional
3.4-3.8 GHz	3.4-3.6 GHz	Adjudicada y susceptible de ser utilizada para prestación de servicios 5G de acuerdo con lo dispuesto en Ley 9/2014, de 9 de mayo, General de Telecomunicaciones ¹ . Cuatro licenciatarios que disponen de 2x20 MHz, con utilización de los 2x20 MHz restantes para servicios de radiolocalización y bandas de guarda ² .
	3.6-3.8 GHz	Actualmente finalizando su proceso de liberación.
700 MHz		Utilizada actualmente para la difusión de la TDT. Disponibilidad pendiente del proceso para la liberación del segundo dividendo digital, que permitirá su utilización para la prestación de servicios de comunicaciones móviles.
26 GHz		Disponible para uso inmediato. 400 MHz y 500 MHz en la parte baja de la banda, así como otros 500 MHz con algunas limitaciones, en la parte alta de la banda. Resto de la banda en uso por radioenlaces del servicio fijo punto a punto de redes troncales de telefonía móvil.

¹ Artículo 66 y Disposición Transitoria cuarta de la Ley 9/2014, de 9 de mayo, General de Telecomunicaciones, por aplicación de los principios de neutralidad tecnológica y de servicios.

² Ver Nota 107 del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF). Los servicios de radiolocalización en esta banda están ligados a sistemas para la defensa nacional.

2.4 Campos Electromagnéticos y Efectos Biológicos

En la actualidad, el avance tecnológico que aportan las comunicaciones inalámbricas, se basa en el interfaz físico proporcionado por los denominados CEM.

En nuestro día a día, todas las poblaciones se encuentran expuestas a CEM en mayor o menor medida, y conforme avanza la tecnología, el grado de exposición continúa creciendo. Debido al desarrollo de las fuentes de CEM en nuestro entorno, son múltiples los gobiernos, organizaciones, grupos ecologistas y científicos que muestran su interés en este tema [17].

Los potenciales efectos sobre la salud de los CEM son causa común de desconcierto, ansiedad y desconocimiento creciente en nuestro entorno. Es de vital importancia poner en conocimiento que los efectos producidos dependen de la intensidad y de la frecuencia de la señal electromagnética (EM). A la hora de hablar de exposición EM es necesario diferenciar entre dos tipos de radiaciones, las ionizantes (RI) y las no ionizantes (RNI).

Las ondas de radio, microondas, infrarroja y la luz visible son tipos de radiación que no poseen energía suficiente para producir ionización, las cuales son conocidas como RNI [18].

La RNI (0 Hz- 300 GHz) está formada por campos eléctricos y magnéticos distinguibles por su frecuencia de trabajo. La exposición a estos campos se produce en todos los ámbitos de la sociedad: en el hogar, en el trabajo, en las escuelas y en medios de transporte.

El principal efecto biológico científicamente demostrado de los CEM en las frecuencias de interés de este trabajo, las RF de **3 kHz a 300 GHz**, es el calentamiento de los tejidos. La exposición de las personas a campos de frecuencia superior a 100 kHz causa calentamiento a través de la absorción de energía [19]. El objetivo desde el punto de vista de seguridad y salud es, por tanto, asegurar que los niveles a los que nos encontramos expuestos sean mucho menores que los necesarios para producir un calentamiento significativo [20].

Las características de los CEM de las RNI en función de la frecuencia, son distintas. En consecuencia, los límites de exposición que aseguran la ausencia de efectos nocivos sobre la salud vienen caracterizados por distintos tipos de magnitudes y sus valores, denominados restricciones básicas [2]:

- Entre **0 y 1 Hz** se proporcionan restricciones básicas de la inducción magnética para campos magnéticos estáticos (0 Hz) y de la densidad de corriente para campos variables en el tiempo de 1 Hz, con el fin de prevenir los efectos sobre el sistema cardiovascular y el sistema nervioso central.
- Entre **1 Hz y 10 MHz** se proporcionan restricciones básicas de la densidad de corriente para prevenir los efectos sobre las funciones del sistema nervioso.
- Entre **100 kHz y 10 GHz** se proporcionan restricciones básicas de la tasa de absorción específica ("*Specific Absorption Rate*" - SAR) para prevenir la fatiga calorífica de cuerpo entero y un calentamiento local excesivo de los tejidos.
- Entre **10 GHz y 300 GHz** se proporcionan restricciones básicas de la densidad de potencia, con el fin de prevenir el calentamiento de los tejidos en la superficie corporal cerca de ella.

Como se ha comentado anteriormente, el presente trabajo se encontrará centrado en la banda de trabajo de **5G**. Respecto a lo dicho en la clasificación anterior, el intervalo de frecuencias de interés se centra en RF que, como se ha dicho corresponde a las frecuencias de **3 kHz a 300 GHz**.

Los CEM hallados entre dichos límites, son capaces de penetrar en los tejidos [21] vivos y generar calor debido a la absorción de la energía por parte de los mismos, fenómeno conocido como efecto térmico.

La Specific Absorption Rate (SAR) o tasa de absorción específica es una medida de la potencia máxima con que un campo electromagnético de radiofrecuencia es absorbido por el tejido vivo y tiene unidades de vatios por kilogramo (W/kg). El SAR es la magnitud empleada por los organismos de regulación gubernamental de muchos países para certificar que los teléfonos móviles actuales cumplen la norma al estar utilizándolos en la región de campo cercano.

La evidencia experimental indica que exposiciones de 30 minutos a CEM con la Specific Absorption Rate (SAR) de aproximadamente 4 W/kg de tejido expuesto, pueden provocar en humanos en reposo incrementos de temperatura iguales o cercanos a 1 °C [22] que se consideran perjudiciales para la salud.

En Estados Unidos, la Federal Communications Commission (FCC) ha impuesto un límite SAR de 1.6 W/kg, promediado sobre un volumen de 1 gramo de tejido, para la cabeza, mientras que, en el continente europeo, el límite es de 2 W/kg, en promedio de un volumen de 10 gramos de tejido corporal [23], [24].

A nivel europeo se deben seguir las directrices del International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) establecidas en la Recomendación Europea 1999/519/CE en cuanto a este y otros límites de exposición.

El objetivo principal y sobre todo fundamental es proteger de un calentamiento excesivo, evitando el efecto indeseado de aumentar 1 °C la temperatura de los tejidos orgánicos afectados.

La restricción básica impuesta se basa en [22]:

- **Promedio de SAR de todo el cuerpo (100kHz – 300GHz)**
 - Público Ocupacional: un SAR promedio de 0.4 W/kg en todo el cuerpo, con un promedio de más de 30 min.
 - Público General: un SAR promedio de 0.08 W/kg en todo el cuerpo, con un promedio de más de 30 min.
- **SAR Local (100kHz – 6GHz)**
 - **Cabeza y Torso:**
 - Público Ocupacional: un SAR promedio de 10 W/kg en 10 g, promediado en un intervalo de 6 min.
 - Público General: un SAR promedio de 2 W/kg en 10 g, promediado en un intervalo de 6 min.
 - **Extremidades:**
 - Público Ocupacional: un SAR promedio de 20 W/kg en 10 g, promediado en un intervalo de 6 min.
 - Público General: un SAR promedio de 4 W/kg en 10 g, promediado en un intervalo de 6 min.

En Europa se han de seguir las directrices del ICNIRP establecidas en “*Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)*”³. En la actualidad, la mejor manera de realizar las mediciones referentes a las restricciones básicas es a través de *phantoms*, o recipientes rellenos de líquidos que simulan el cuerpo humano (Figura 2-7). Sin embargo, esto es una solución económicamente costosa.

Debido a esto, son definidos los denominados niveles de referencia (campo eléctrico, magnético y densidad de potencia) que son mucho más sencillos de medir en el aire, y sus límites aseguran el cumplimiento de las restricciones básicas como se comentaba en la Introducción del presente documento.

Sin embargo, existe un inconveniente en cuanto a las magnitudes de los niveles de referencia. Estas únicamente pueden ser medidas de manera correcta en la denominada región de campo lejano (distancia mínima de aproximadamente tres veces la longitud de onda de la frecuencia bajo análisis) [4], [5].

³ Desde que se realizó la publicación de las directrices de 1998, existen avances tecnológicos que ponen en cuestión la relación entre los CEM de RF y los resultados adversos para la salud, debido a esta razón, la ICNIRP actualizó las directrices las cuales protegen a los humanos contra la exposición electromagnética de 100 kHz a 300 GHz. La presente publicación remplaza a las existente de 1998 y a la actualización realizada en 2010 para frecuencias de 100 kHz a 10 MHz. [44]

Esto implica una problemática a la hora de caracterizar dispositivos que utilizan distancias menores, como ocurre con los “*smartphones*” o los “*wearables*”.



Figura 2-7: Sistema de medida SAR [25], [26]

En las siguientes tablas se resume los niveles de referencia referentes en cuanto a densidad de potencia incidente en el rango de frecuencias de análisis del presente estudio [22]:

Tabla 2-2. Niveles de referencia de exposición de cuerpo entero y exposición local. ^a

Densidad de potencia incidente (S_{inc} (W/m ²))			
		Cuerpo entero (30 min.)	Exposición Local (6 min.)
2 – 6 GHz	Ocupacional	50	200
	General	10	40
6 – 300 GHz	Ocupacional	50	$275/f_G^{0.177}$
	General	10	$55/f_G^{0.177}$

^a Nota:

1. Para frecuencias de 30 MHz a 6 GHz: **a)** Dentro de la zona de campo lejano, se demuestra que se cumple si uno de los valores máximos de S_{inc} ⁴, E_{inc} o H_{inc} espaciales, en el espacio de cuerpo entero proyectado, no excede los valores del nivel de referencia mencionados anteriormente (sólo se requiere uno); el S_{inc} puede sustituirse por el S_{eq} ⁵; **b)** Dentro de la zona de campo cercano radiactivo, se demuestra que se cumple si uno de los valores máximos de S_{inc} espaciales, o ambos valores máximos de E_{inc} y H_{inc} espaciales, en el espacio de cuerpo entero proyectado, no excede los valores del nivel de referencia mencionados anteriormente; y **c)** Dentro de la zona de campo cercano reactivo: se demuestra el cumplimiento si tanto E_{inc} como H_{inc} no exceden los valores del nivel de referencia mencionados anteriormente; no se puede utilizar el S_{inc} para demostrar el cumplimiento; para las frecuencias >2 GHz, los niveles de referencia no se pueden utilizar para determinar el cumplimiento, por lo que se deben evaluar las restricciones básicas.

⁴ S_{inc} : Densidad de Potencia Incidente (W/m²)

⁵ S_{eq} : Densidad de Potencia Incidente equivalente a Onda Plana (W/m²)

Visto los niveles de referencia referentes a densidad de potencia incidente, si observamos los respectivos de campo eléctrico y magnético son:

Tabla 2-3. Niveles de referencia de exposición de cuerpo entero y exposición local.

		Cuerpo entero (30 min.)		Exposición Local (6 min.)	
		E_{inc} (V/m)	H_{inc} (A/m)	E_{inc} (V/m)	H_{inc} (A/m)
2 – 6 GHz	Ocupacional	137	0.36	274	0.72
	General	61	0.16	122	0.32
26 GHz	Ocupacional	137	0.36	242	0.64
	General	61	0.16	108	0.28

^a Nota:

1. Cálculos realizados con la impedancia intrínseca del vacío a través de la ecuación: $S = E^2/\eta_0$

2.5 Caracterización de la exposición electromagnética en ondas en alta frecuencia

Como punto de partida para el presente trabajo, se ha escogido de referencia el artículo de T. Hamed [27], en el cual se analiza en diferentes frecuencias la distribución de SAR provocada por una antena en dos modelos (capa única y multicapa), además de realizar un estudio de aumento de temperatura.

En primer lugar, los autores del trabajo diseñan una antena de parche en *CST Microwave Studio* (CST MWS) a diferentes frecuencias (28, 40 y 60 GHz), cuyos esquemáticos son:

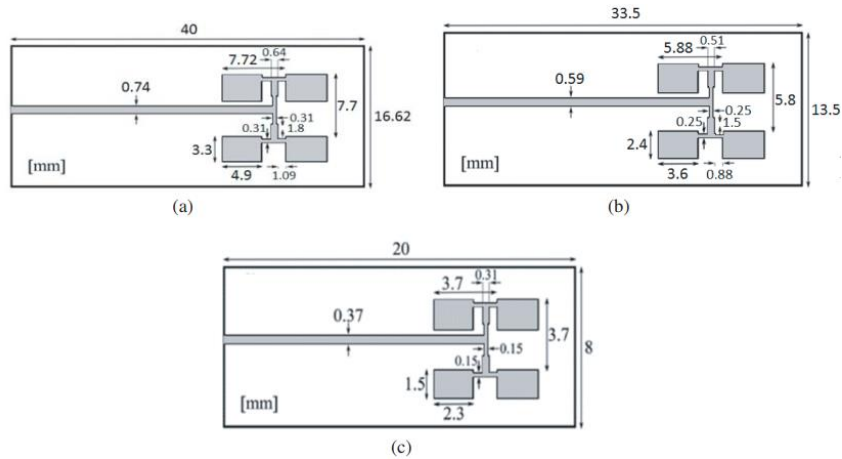


Figura 2-8. Representación esquemática de un array parche 2x2, (a) 28 GHz, (b) 40 GHz, (c) 60 GHz [27].

La antena diseñada, para las frecuencias nombradas, tiene unas ganancias de 11.23 dB, 12.53 dB y 12.93 dB respectivamente. Las diferentes capas de análisis son las siguientes:

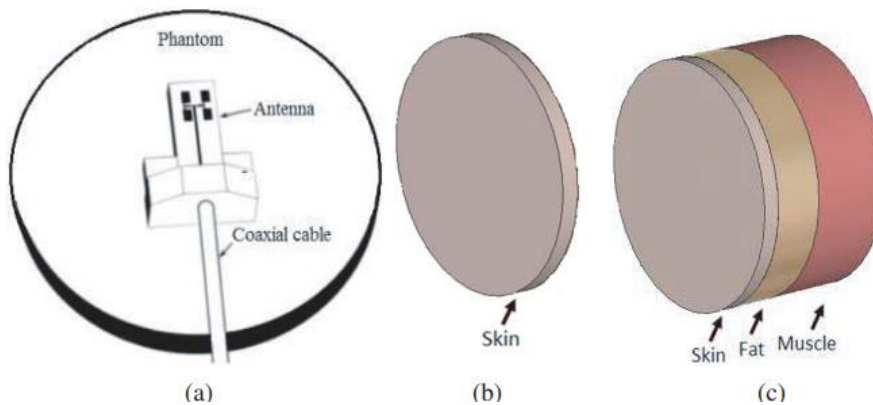


Figura 2-9. Representación esquemática de los tejidos, (a) modelo cilíndrico con antena, (b) modelo de capa única, (c) modelo multicapa [27].

Como se puede observar, el estudio de Hamed hizo uso de un modelo cilíndrico con un diámetro de 70 mm y un grosor de 7 mm, con un espaciado entre antena y tejido de 0.5, 3 y 5.5 mm. Las propiedades dieléctricas consideradas para los diferentes tejidos a cada frecuencia de estudio fueron las siguientes:

Tabla 2-4. Propiedades dieléctricas del cuerpo humano [27].

Tejido	Densidad (kg/m ³)	Permitividad relativa (ϵ_r)			Conductividad (S/m)		
		28 GHz	40 GHz	60 GHz	28 GHz	40 GHz	60 GHz
Piel	1109	16.55	11.69	36.38	16.55	11.69	36.38
Grasa	1090	24.43	18.24	12.86	33.6	43.13	52.80
Músculo	911	6.09	5.21	8.39	6.09	5.21	8.39

Las conclusiones que se obtuvieron para el modelo de capa única y modelo de capa triple para un valor de SAR promediado a 1g de masa corporal son:

Tabla 2-5. Datos finales del estudio de Hamed en el modelo capa única [27].

Frecuencia (GHz)	SAR (W/kg)	Incremento de Temperatura (°C)
28	0.568	0.18
40	0.486	0.11
60	0.885	0.21

Tabla 2-6. Datos finales del estudio de Hamed en el modelo capa triple [27].

Frecuencia (GHz)	SAR (W/kg)	Incremento de Temperatura (°C)
28	0.646	0.5
40	0.516	0.3
60	0.976	0.59

Se pueden apreciar dos datos muy importantes. En primer lugar, en ambos modelos los resultados de SAR son claramente mayores a la frecuencia de 60 GHz que a las otras frecuencias de análisis. En segundo lugar, el mayor incremento de temperatura observado es de 0.59°C, el cual se encuentra por debajo del límite de incremento de temperatura que asegura la ausencia de efectos nocivos para la salud (1°C) [22].

El presente Trabajo Fin de Máster, hace uso de la misma técnica numérica (FDTD – *Finite Domain Time Domain*), disponible en el software comercial CST MWS para ejecutar las simulaciones y calcular los valores de SAR.

Por otra parte, se propone a través del mismo modelo de multicapa una metodología de medidas con el objetivo de ser capaces, a través de simulaciones, de discernir en cuál de las N capas del cuerpo humano se observa una mayor pérdida de potencia y poder caracterizar de manera individual y detallada su comportamiento frente a la exposición a CEM.

3 Caracterización mediante simulación de antena y modelo realista

3.1 Introducción

A través del software comercial CST Microwave Studio (MWS) se han realizado simulaciones de SAR medido en W/kg, realizando una comparativa entre dos tipos de antena junto a un modelo de cabeza propio del software, en este caso, CST MWS.

Como se ha comentado en el epígrafe 2.3 Gestión del espectro radioeléctrico, las bandas de trabajo de la tecnología 5G en España se encuentran en las detalladas en la Tabla 2-1. El presente estudio se ha centrado en las frecuencias que se encontrarán en la banda sub-6 GHz, en este caso (3.7 GHz).

El presente apartado pretende conseguir resultados lo más realista posibles. Para conseguir este objetivo, se diseña y simula dos tipos de antenas diferentes, por un lado, un dipolo $\lambda/2$, por otro lado, una antena en tecnología microstrip, ya que son las tecnologías más utilizadas en los dispositivos móviles (con varias variantes más complejas tipo “*Planar Inverted F-antenna*” - PIFA, etc., pero que producen una radiación similar).

3.2 Descripción del modelo de simulación

El modelo de cabeza utilizado es el Maniquí Antropomórfico (SAM–“*Specific Anthropomorphic Mannequin*”) unido en una primera iteración a un dipolo elemental de 3.7 GHz y en una segunda iteración a una antena de tecnología microstrip. El modelo de cabeza consiste en una capa interna y externa que tienen propiedades dieléctricas similares a las de una cabeza humana real⁶.

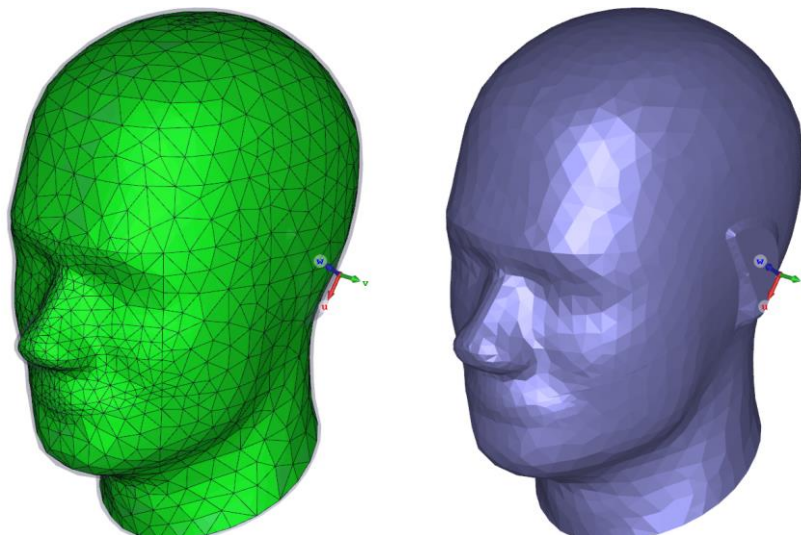


Figura 3-1. Modelo de cabeza. A) Capa Interior. B) Capa Exterior.

⁶ La capa externa modela la piel humana y la capa interna modela el interior de la cabeza humana (tejido, huesos, líquidos y cavidades).

Las propiedades dieléctricas son constantes en todo momento a una frecuencia concreta de modo que los datos pertenecientes a dicho modelo de cabeza son:

Tabla 3-1. Datos del modelo de cabeza antropomórfico a 3.7GHz

SAM Material	Permitividad relativa (ϵ_r)	Conductividad (σ) (S/m)
SAM Shell (exterior)	42	0.99
SAM Liquid (interior)	5	0.0125

Se ha aplicado la técnica de integración finita en el dominio de tiempo (FITD), disponible en el software comercial CST MWS y análoga al método de dominio de tiempo de diferencias finita (FDTD) para ejecutar las simulaciones y calcular los valores de SAR. Este método FDTD [28], [29] calcula los valores de SAR dividiendo el volumen del modelo de cabeza en celdas más pequeñas.

Como se ha comentado anteriormente, se pretende realizar el cálculo de SAR, el cual es una medida de la potencia electromagnética absorbida por el cuerpo humano sobre un volumen específico de tejido, en nuestro caso, el modelo de cabeza. Para calcular el SAR se hace uso de la siguiente ecuación:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{2\rho} \quad (W/kg) \quad \text{Ecuación 2}$$

donde σ es la conductividad del tejido (S/m), E es el campo eléctrico en el tejido (V/m), y ρ la densidad del tejido (kg/m^3). La potencia radiada utilizada para esta simulación del modelo “realista” fue de 23 dBm y 26 dBm, es decir, 200 mW y 400 mW respectivamente, son las potencias radiadas mínima y máxima [30] en los equipos de usuario en función del tipo de dispositivo. El método utilizado para calcular la SAR en esta simulación es la norma IEC/IEEE62704-1 [31], el cual se realiza sobre 10g de masa.

A continuación, se presentan dos figuras que hacen referencia, por un lado, al modelo de cabeza junto a la antena más simple (dipolo $\lambda/2$ a 3.7 GHz), por otro lado, junto a la antena microstrip diseñada a 3.7 GHz. Dichas antenas, han sido colocadas a una distancia de 9.7 mm, se ha escogido esta distancia simulando el ancho de un *smartphone* comercial de la actualidad (Motorola G7 Power).

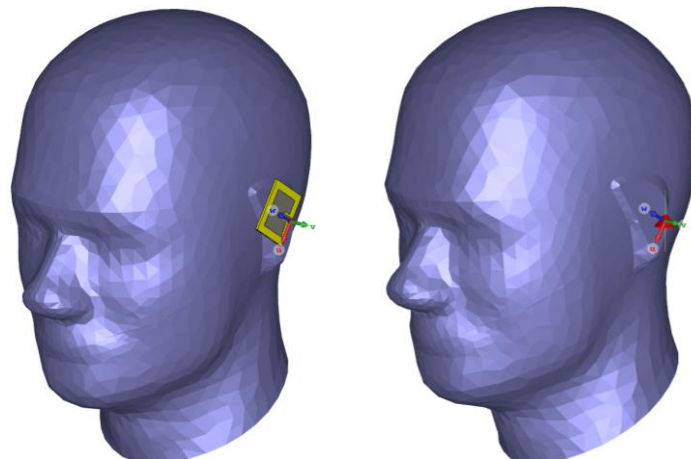


Figura 3-2. Modelo de cabeza. A) Junto a antena microstrip. B) Junto a dipolo.

3.3 Diseño de antena con tecnología microstrip

Para el diseño y simulación de la antena utilizada en el presente Trabajo Fin de Master, ha sido necesario aplicar las ecuaciones ligadas al análisis de antenas microstrip para saber las dimensiones que se debían de utilizar en el diseño.

Para una primera aproximación de diseño, se utilizan las siguientes expresiones [32] para calcular la anchura y longitud que debe tener el parche para que resuene a la frecuencia de operación esperada en función de los siguientes parámetros:

Tabla 3-2. Parámetros principales de diseño de la antena microstrip.

Frecuencia (f_0)	3.7 GHz
Material	FR4 (Fibra de vidrio)
Constante dieléctrica (ϵ_r)	4.3
Altura del dieléctrico (h)	1.5 mm
Velocidad de la luz	$3 \cdot 10^8$ m/s

Cálculo del ancho (W):

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\left(\frac{\epsilon_r + 1}{2}\right)}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Cálculo de la permitividad dieléctrica efectiva:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \cdot \frac{h}{W}\right)^{-1/2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Incremento de la longitud (ΔL):

$$\Delta L = 0.412 \cdot h \cdot \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0.8\right)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Cálculo de la Longitud Efectiva:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Cálculo de la Longitud (L):

$$L = L_{eff} - 2 \cdot \Delta L \quad \text{Ecuación 7}$$

Cálculo de la longitud del plano de tierra (L_g):

$$L_g = 6 \cdot h + L \quad \text{Ecuación 8}$$

Cálculo de la anchura del plano de tierra (W_g):

$$W_g = 6 \cdot h + W \quad \text{Ecuación 9}$$

Cálculo de las dimensiones de la línea microstrip (W_0)

$$\frac{W_0}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \frac{W_0}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \frac{W_0}{h} > 2 \end{cases} \quad \text{Ecuación 10}$$

donde:

$$\begin{cases} A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)} + \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \\ B = \frac{377\pi}{2Z_0\epsilon_r} \end{cases} \quad \text{Ecuación 11}$$

A frecuencia de diseño de la antena es 3.7 GHz, el cálculo de la impedancia de entrada viene dada por:

$$Z_{in} = \frac{1}{2G_1} = \frac{1}{2 \left(\frac{1}{90} \left(\frac{W}{\lambda_0} \right)^2 \right)} \quad \text{Ecuación 12}$$

donde G_1 , es la conductancia de radiación y puede ser calculada a partir de la potencia total radiada, W la anchura del parche y λ_0 la longitud de onda perteneciente a 3.7 GHz.

Como la antena diseñada tendrá dos intersecciones, se han de tener en cuenta los acoplamientos sufridos, es por ello, que la impedancia de entrada se deberá calcular como:

$$Z_{in} = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \quad \text{Ecuación 13}$$

Es importante conocer la impedancia de entrada del parche ya que para conseguir una buena adaptación de impedancia es necesario que coincidan la impedancia característica de la línea de transmisión y la impedancia de entrada de la antena.

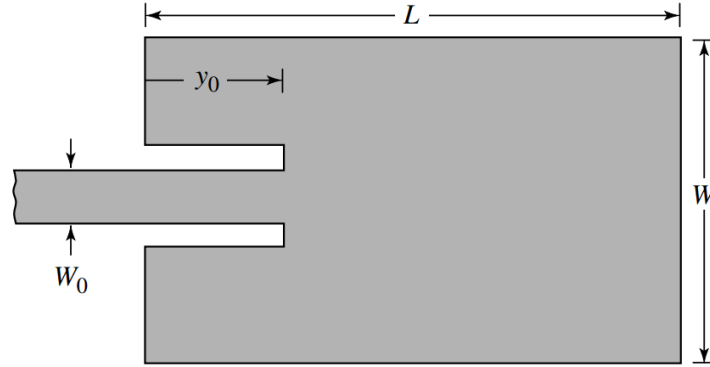


Figura 3-3. Antena Microstrip tipo a diseñar [32].

La impedancia de entrada y el punto de alimentación se encuentran estrechamente ligados. Para ello, es necesario tener en cuenta la siguiente gráfica:

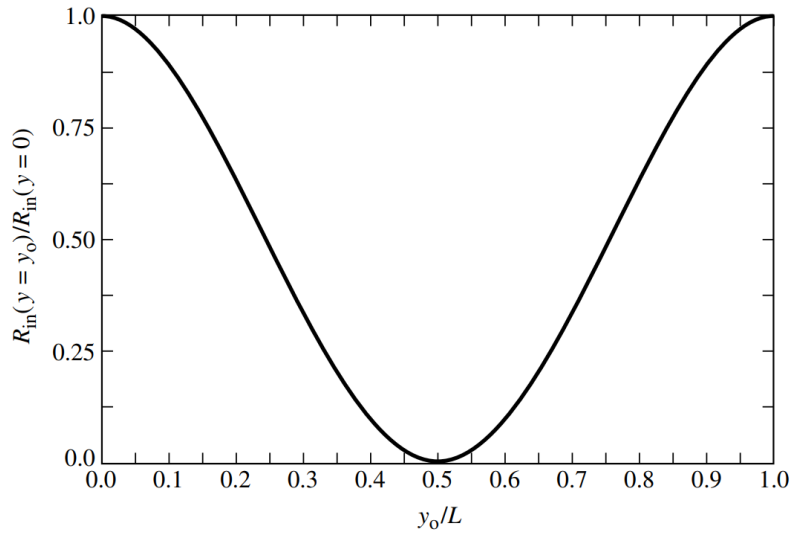


Figura 3-4. Resistencia de entrada normalizada [32].

En la figura anterior, se puede apreciar el comportamiento referente a la impedancia de entrada normalizada de una antena microstrip en función a la localización de su puerto de alimentación [32]. Por otra parte, se puede apreciar que la impedancia de entrada toma su valor máximo en los bordes del parche y el mínimo en su centro.

Teniendo en cuenta esto, la relación entre la impedancia de entrada (Z_{in}) y el punto de alimentación (y_0) es la siguiente:

$$Z_{in}(y = y_0) = \frac{1}{2(G_1 \pm G_{12})} \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right)$$

$$= Z_{in}(y = 0) \cos^2\left(\frac{\pi}{L} y_0\right)$$

Ecuación 14

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 3-3. Datos de la antena microstrip

Descripción	Tamaño (mm)
Anchura del plano de tierra (W_g)	34
Anchura (W)	25
Constante dieléctrica efectiva (ϵ_{eff})	3.9
Incremento en longitud (ΔL)	0.69
Longitud del plano de tierra (L_g)	28
Longitud (L)	19
Longitud efectiva (L_{eff})	20.5
Anchura de la línea (W_0)	3
Profundidad de inserción (y_0)	5

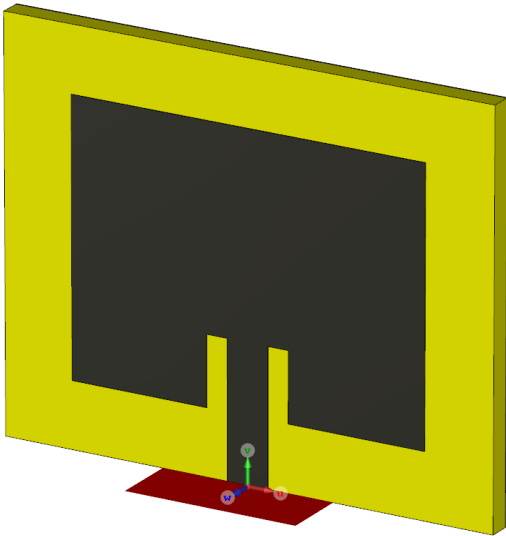


Figura 3-5. Antena de parche a 3.7 GHz.

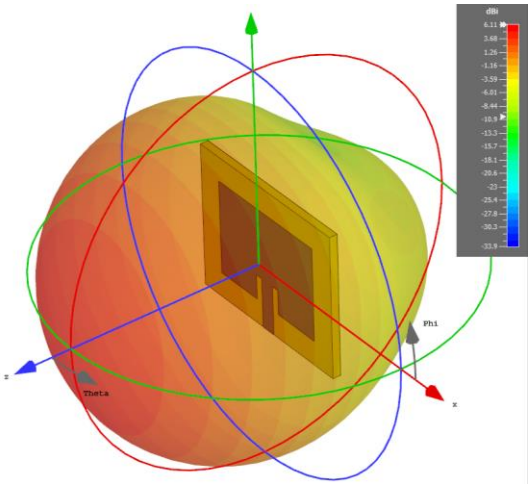


Figura 3-6. Diagrama de radiación en 3D.

A continuación, realizada la simulación de la antena, se muestran a través de las siguientes figuras (Figura 3-7 y Figura 3-8) el parámetro S_{11} y la ganancia directiva de la misma:

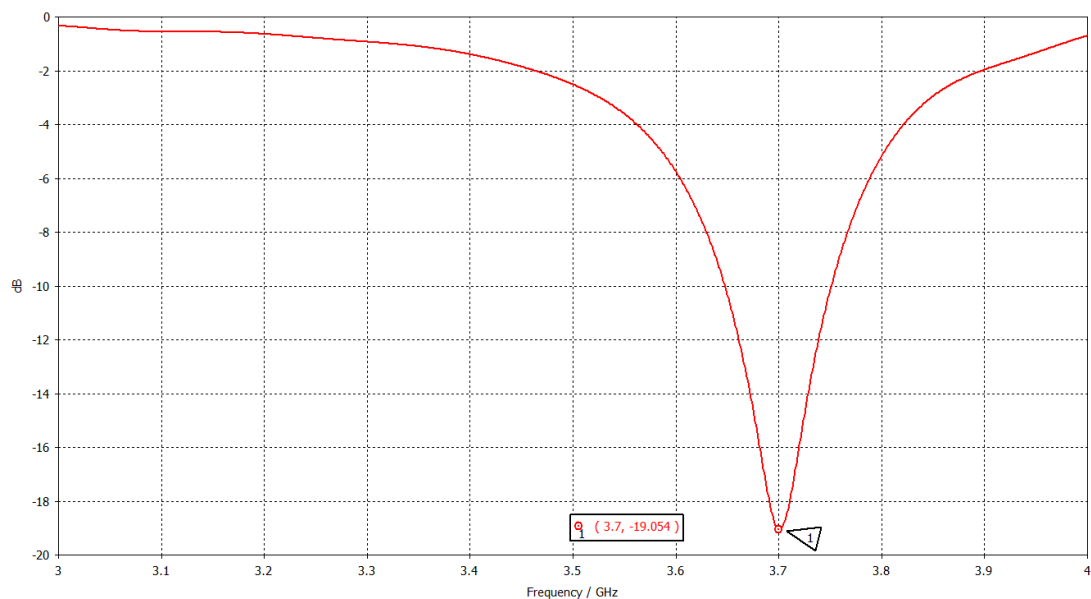


Figura 3-7. Parámetro S_{11} (dB).

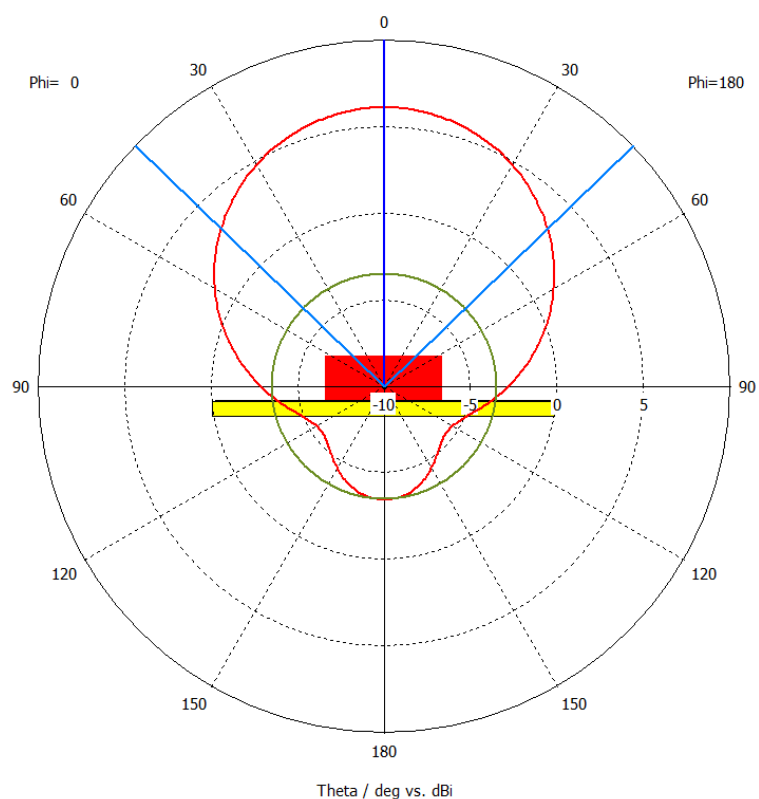


Figura 3-8. Ganancia directiva (dBi).

3.4 SAR-Specific Absorption Rate

3.4.1 Resultados de SAR a 23 dBm

Se procede a realizar una comparativa de la exposición existente a 3.7 GHz entre un dipolo elemental en dicha frecuencia y la antena microstrip diseñada.

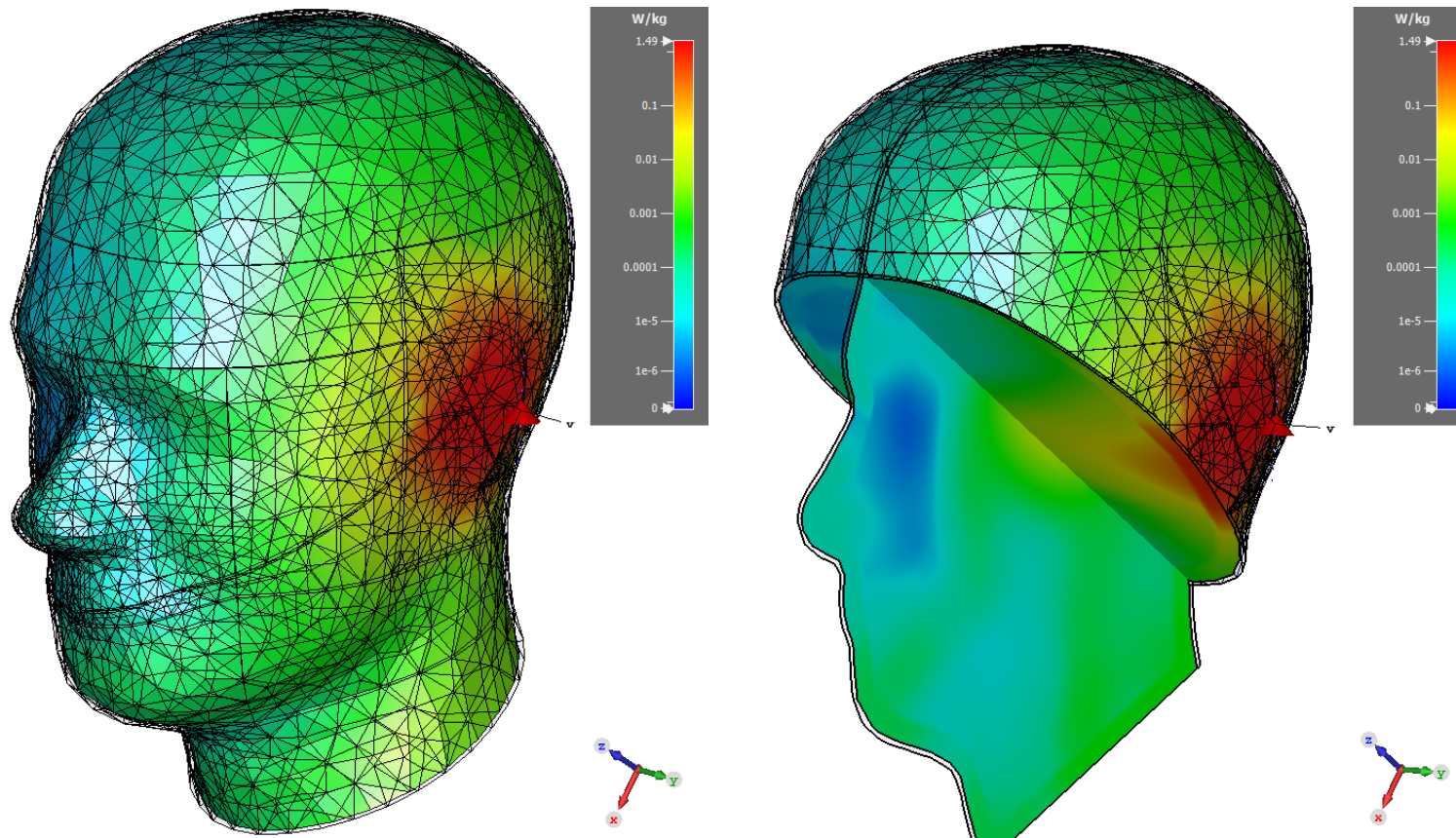


Figura 3-9. Distribución de SAR con dipolo elemental en 3.7 GHz.

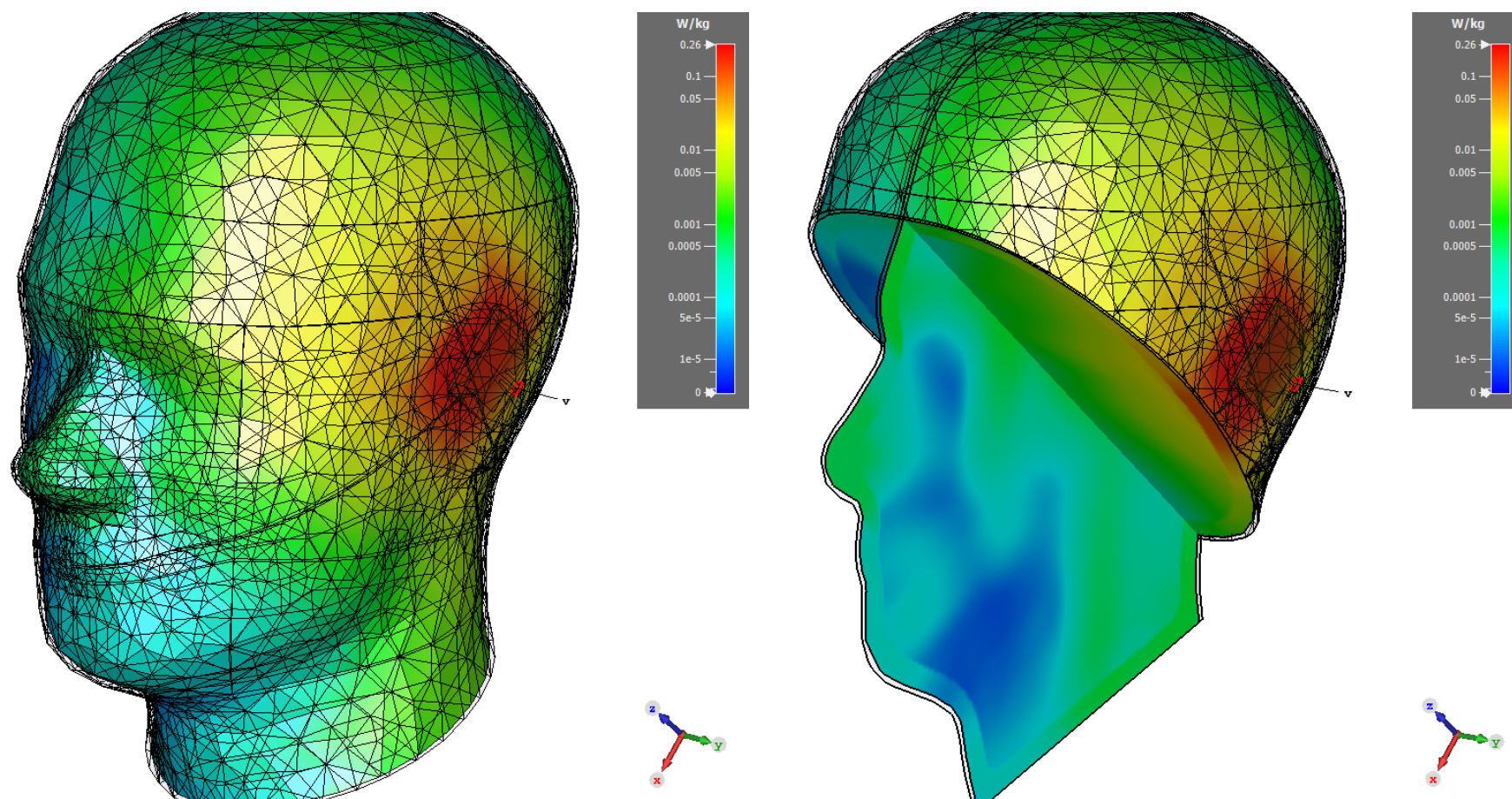


Figura 3-10. Distribución de SAR con antena microstrip en 3.7 GHz.

3.4.2 Resultados de SAR a 26 dBm

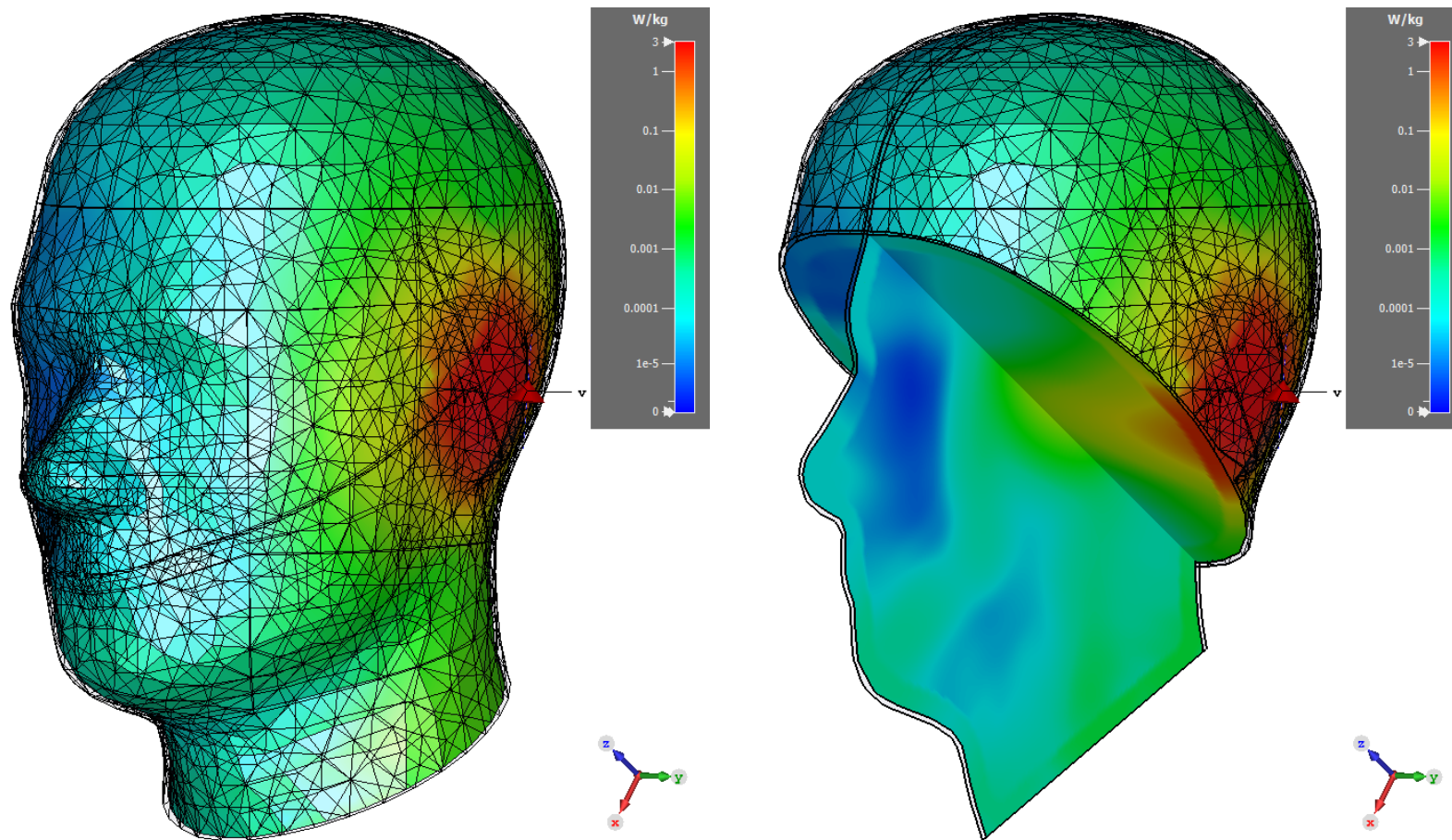


Figura 3-11. Distribución de SAR con dipolo elemental en 3.7 GHz.

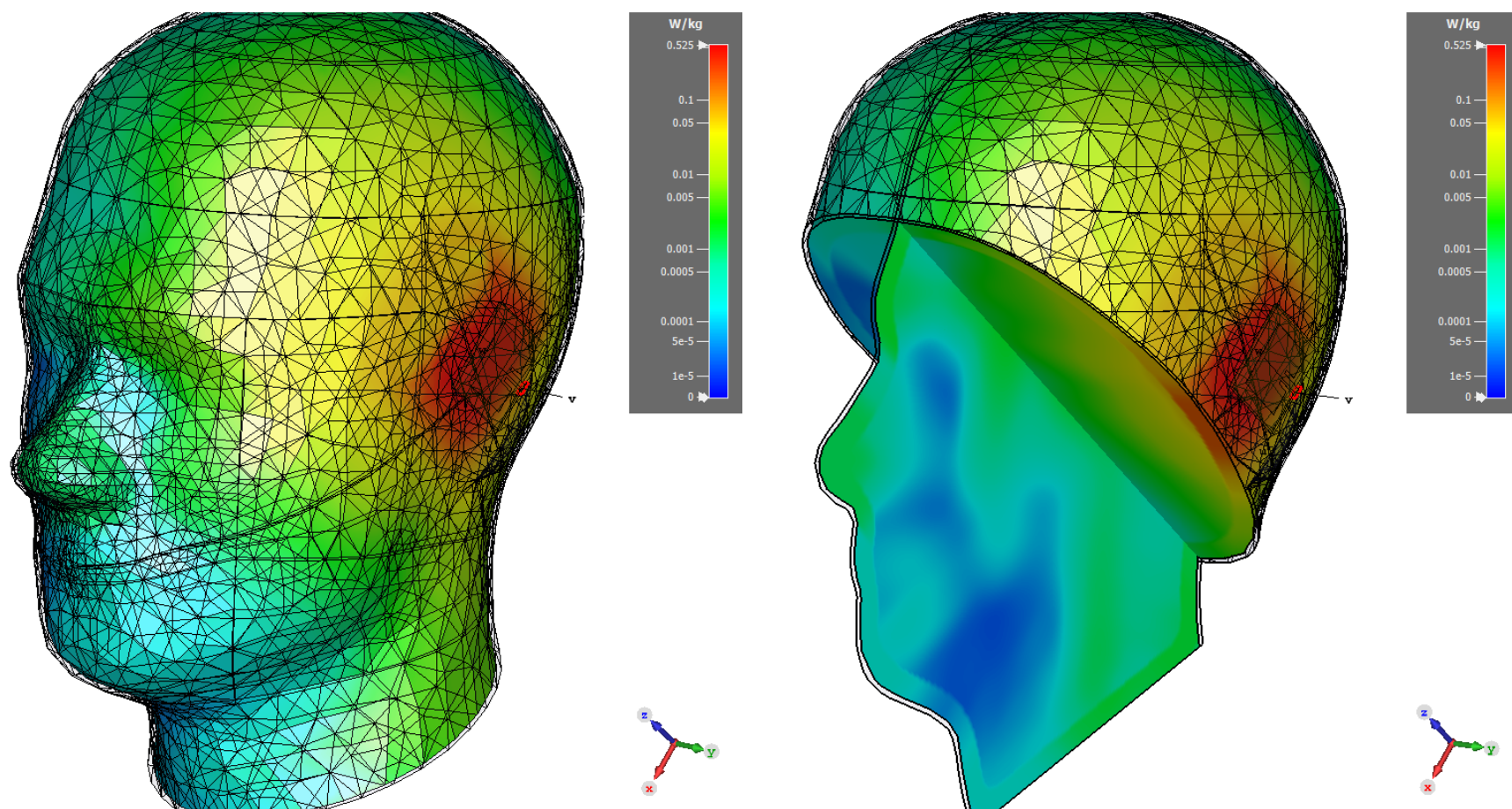


Figura 3-12. Distribución de SAR con antena microstrip en 3.7 GHz.

A continuación, se representa una gráfica referenciando al decaimiento del SAR (W/kg) en función a la distancia. Dicha gráfica es el resultado ligado a la Figura 3-12, es decir, a una potencia de 26dBm radiando con una antena en tecnología microstrip.

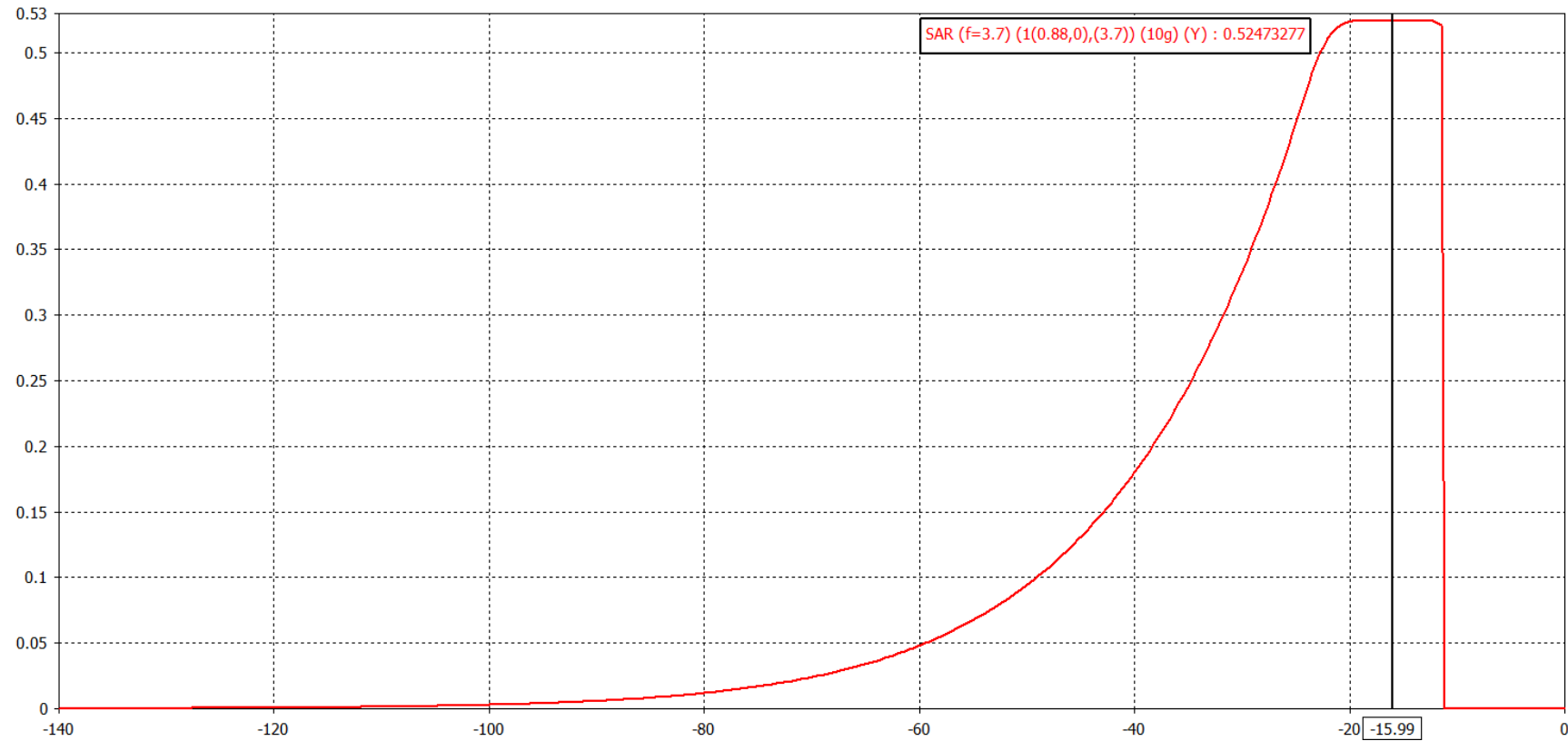


Figura 3-13. SAR vs. Distancia

Se puede observar como el SAR tiene un carácter de decaimiento extrapolable a una función exponencial. Es importante, que nos demos cuenta que en la coordenada (0,0), se encuentra nuestra antena, y que la SAR es igual a 0 en la región de aire previa a la interfaz aire-cabeza, pues en esta simulación el aire se ha tomado como el vacío ideal y por tanto no disipa potencia electromagnética.

3.5 Low-Power Exclusion Level

Cuando el destino de un dispositivo transmisor es ser utilizado como dispositivo cercano al cuerpo humano, este requiere una evaluación de SAR (W/kg) [33]. El presente apartado tiene como objetivo calcular la potencia máxima que un dispositivo móvil podría radiar para verificar el valor límite de exposición dado por el SAR en las bandas de frecuencia de análisis, concretamente 2 W/kg.

Como se ha podido observar a través del capítulo anterior, más concretamente en la (Integración en equipo de usuario, la **ganancia directiva** conseguida en [13], referente a una antena MIMO dentro de un dispositivo móvil en 3.7 GHz, ronda los **4.5 dBi**. Por otra parte, la ganancia directiva de una antena en tecnología microstrip, como la diseñada en el presente Trabajo Fin de Máster, es de **6.1 dBi** (Figura 3-6).

La ecuación referente a un balance de potencias genérico de un radioenlace, teniendo en cuenta como punto de partida el dispositivo móvil, es decir, el Up-Link es la siguiente:

$$P_{TX} + G_{TX} - L_{FSL} - L_{EXTRAS} + G_{RX} = P_{RX} \quad (dBW) \quad \text{Ecuación 15}$$

donde la P_{TX} hace referencia a la potencia del transmisor, G_{TX} y G_{RX} a las ganancias de los sistemas radiantes transmisor y receptor, y P_{RX} hace referencia a la potencia recibida; L_{FSL} hace referencia a las pérdidas de espacio libre entre transmisor y receptor y L_{EXTRAS} hace referencia a cualquier otro tipo de pérdidas adicionales.

Si se trabaja en unidades logarítmicas, la relación entre P_{RX} y el SAR viene dada por un conjunto de factores (ver Ecuación 2 por ejemplo) que se pueden agrupar en un factor de conversión que suma o resta en la igualdad. Teniendo en cuenta esto y la ecuación anterior, se puede relacionar la P_{TX} con la SAR a través de otra constante (**K**, por ejemplo) que tiene en cuenta el factor de conversión mencionado y la relación entre P_{TX} y P_{RX} dada por la fórmula de Friis. Esta nueva relación se expresa en la Ecuación 16:

$$P_{TX} + K = 10 \cdot \log (SAR) \quad \text{Ecuación 16}$$

La ecuación anterior, puede particularizarse para uno de los casos analizados en las simulaciones de este trabajo, concretamente para el valor de 26 dBm de P_{TX} , para el que se obtuvo un SAR de 0.525 W/kg, es decir de -2.80 dBW/kg.

Por tanto, podemos realizar dicha particularización para el valor de SAR máximo admitido (2W/kg o 3.01 dBW/kg).

En el caso de análisis del presente trabajo, se ha de tener en cuenta que la tecnología 5G, emplea el denominado MIMO masivo (2.2 Beamforming y MIMO Masivo) para el conformado de haz, o *beamforming*. Esto implica una ganancia adicional debida al sistema radiante.

De este modo, incluyendo la ganancia del array de antenas y particularizando para el valor de SAR máximo se obtiene:

$$P_{TX\ MAX} + K + G_{ARRAY} = 10 \cdot \log (SAR_{MAX}) \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde $P_{TX\ MAX}$ es el denominado ***low power exclusion level***. Según esto, si restamos las ecuaciones Ecuación 17 y Ecuación 16 particularizada para 26 dBm, obtenemos:

$$P_{TX-MAX} - 26\ dBm + G_{ARRAY} = 10 \cdot \log (SAR_{MAX}) - -2.8\ dBW/kg \quad \text{Ecuación 18}$$

El valor típico considerado de la ganancia por *beamforming* es de 4.5 dBi [13], por lo que el valor obtenido de potencia transmitida máxima es de 27.31 dBm.

3.6 Discusión de los resultados

Como se ha podido observar el tipo de antena que se utiliza para este tipo de simulaciones es muy importante, ya que en función de su diagrama de radiación ésta conseguirá radiar en dirección al modelo con mucha menor potencia.

Si realizamos una comparativa en función a lo comentado, podemos llegar a comprender el hecho de que las antenas que no se utilicen en los *smartphones* sean dipolos y sí antenas directivas, como la de tecnología microstrip usada en estas simulaciones.

Si resumimos los resultados obtenidos, observamos lo siguiente:

Tabla 3-4. SAR máximo observado a 3.7 GHz.

Potencia (dBm)	SAR _{DIPOLLO} (W/kg)	SAR _{ANT. MICRO} (W/kg)
23	1.49	0.26
26	3	0.525

Se puede apreciar que a una potencia radiada de 23dBm, el dipolo ofrece un valor de SAR máxima (promediada en 10 g según la norma IEC/IEEE62704-1 [31]) bastante mayor (1.49 W/kg) al ofrecido por la antena microstrip (0.26 W/kg). Esto probablemente se deba a que el dipolo tiene un diagrama de radiación omnidireccional, es decir, no es una antena directiva, por lo que gran parte de la potencia radia en dirección al modelo de cabeza.

Sin embargo, como se puede apreciar en la Figura 3 2 A), la antena microstrip se encuentra en una posición tal que radia en la dirección contraria al modelo de cabeza. A pesar de ello, ambos cumplen con la normativa vigente enunciada en el epígrafe 2.4 Campos Electromagnéticos y Efectos Biológicos (< 2 W/kg). Como es de esperar, la SAR máxima se alcanza en la parte anatómica del cuerpo más cercana al dispositivo radiante (en este caso, las inmediaciones de la oreja).

Observando la Tabla 3-4, nuevamente se puede apreciar en las Figura 3-11 y Figura 3-12 como el comportamiento mencionado anteriormente ($SAR_{DIPOLLO} > SAR_{ANT. MICRO}$). Sin embargo, por su parte la exposición observada ante la antena microstrip sigue cumpliendo (0.525 W/kg) con la normativa. No ocurre así esta vez con el dipolo, ya que supera el valor límite de exposición en 1 W/kg.

A pesar de poder conseguir unos resultados concluyentes, este modelo “realista” tiene un inconveniente. Para conseguir precisión, este software realiza un mallado de nuestro modelo. El tamaño de dicho mallado se encuentra estrechamente ligado con el tamaño de la longitud de onda (λ) de la banda frecuencia de simulación. Esto implica un número mayor de celdas de simulación conforme aumenta la frecuencia. Por tanto, existe un compromiso entre precisión y velocidad de las simulaciones, debido a que cuanto más *grueso* (menos celdas) es el mallado realizado, menor exactitud ofrece el resultado, pero finaliza antes. Sin embargo, si buscamos precisión el mallado ha de ser mayor para poder conseguir representar adecuadamente las pequeñas características de nuestro modelo.

A pesar de ello, el tamaño del mallado no puede ser aumentado arbitrariamente. Como se ha comentado, se encuentra ligado al tamaño de la longitud de onda (λ). Para que la malla se comporte igualmente bien para toda la banda analizada, la longitud de onda (λ) restrictiva es la más pequeña de la banda, es decir, la perteneciente a la frecuencia superior y debe ser muestreada a una tasa de al menos 10 celdas de malla por longitud de onda.

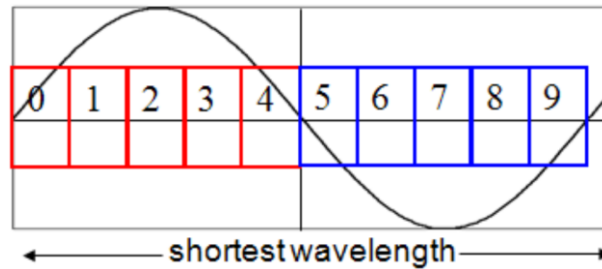


Figura 3-14. Restricción de longitud de onda (λ) más corta.

Por lo tanto, llega un punto en que el valor de frecuencia de simulación es tan alto que, para conseguir resultados fiables y concluyentes, el mallado necesario debe ser tan grande que los tiempos de ejecución se dispararían y la simulación sería inviable.

4 Caracterización mediante el modelo de incidencia de onda plana

4.1 Introducción

Para la realización de simulaciones del presente apartado, se ha hecho uso de un software desarrollado por el grupo de investigación RFCAS (Radio Frecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas) [34] que implementa un modelo de incidencia de ondas planas sobre un medio multicapa.

Como se ha comentado al final del capítulo anterior, en el cual el estudio ha sido realizado con un modelo realista, que incluye un modelo de cabeza humana que consta de dos capas (exterior e interior) que simulan una cabeza humana real con dos tipos antenas (dipolo $\lambda/2$ y microstrip), en la frecuencia sub-6 GHz del estándar 5G (3.7 GHz), el aumento en frecuencia de dichas simulaciones sería imposible de llevar a cabo sin utilizar una gran cantidad de recursos computacionales a frecuencias de ondas milimétricas para 5G, como puede ser 26 GHz.

Sin embargo, a dichas frecuencias, la naturaleza de campo lejano se alcanza a una menor distancia física del dispositivo radiante, dado que la longitud de onda es mucho menor. Por todo esto, en aras de realizar un análisis a estas frecuencias más alta, en el presente Trabajo Fin de Máster se propone un modelo de incidencia de onda plana sobre un medio multicapa que emule diferentes capas de tejido humano para proseguir el estudio a las frecuencias más altas de interés (26 GHz y 60 GHz).

Para verificar la validez de esta simplificación, se realizan también simulaciones de las frecuencias bajas (sub-6 GHz) con el modelo de onda plana, a fin de ser capaces de comparar ambos modelos de simulación.

Uno de los objetivos del presente trabajo, es ser capaces de analizar la absorción de potencia existente en las diferentes capas del cuerpo humano. Para ello sería necesario un análisis tanto del campo eléctrico (E) como del campo magnético (H). Sin embargo, este análisis se ve condicionado por la relación existente entre ambas magnitudes según la proximidad a la fuente de radiación.

4.2 Descripción teórica del modelo de incidencia de onda plana

Por un lado, se encuentra la zona de campo cercano en la que es necesario conocer los campos E y H por separado. Por otro lado, la región de campo lejano en la cual se puede asumir que la radiación se comporta como una **onda plana** [4], [5], [35], es decir, **los campos son ortogonales** entre sí, pudiendo relacionarse entre sí a través de la impedancia característica del vacío (η_0):

$$E = \eta_0 \cdot H \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde en la Ecuación 19 se omite el carácter vectorial de los campos al asumir que el campo eléctrico (E) es perpendicular al campo magnético (H), siendo ambos perpendiculares a la dirección de propagación de la onda plana.

Por tanto, la densidad de potencia (S), en esta región se puede obtener con la multiplicación del campo eléctrico con el campo magnético (considerando que en campo lejano el frente de ondas es plano):

$$S = E \cdot H \quad \text{Ecuación 20}$$

Esta densidad de potencia se propaga en la dirección de la onda plana, como es obvio. Teniendo en cuenta las ecuaciones Ecuación 19 y Ecuación 20 podemos realizar el cálculo de la densidad de potencia como:

$$S = \frac{E^2}{\eta_0} (W/m^2) \quad \text{Ecuación 21}$$

Los parámetros de partida necesarios son los denominados permitividad relativa (o constante dieléctrica) y conductividad eléctrica, es decir, las propiedades dieléctricas del material (tejidos en este caso).

Una de las consideraciones importantes que se han de tener en cuenta es el fenómeno asociado a la variación temporal, la denominada **dispersión**, que consiste en la dependencia existente entre la señal aplicada y la frecuencia de la misma. Si expresamos de manera fasorial el campo eléctrico variando en tiempo tenemos:

$$E(r, t) = Re(\tilde{E}(r, \omega) \cdot e^{j\omega t}) \quad \text{Ecuación 22}$$

Su vector desplazamiento $D(r, t)$, podrá ser expresado de manera análoga, por lo que la proporcionalidad que se estable entre sus amplitudes será:

$$\tilde{D} = \varepsilon(\omega) \tilde{E} \quad \text{Ecuación 23}$$

En dicha expresión, $\varepsilon(\omega)$ es una cantidad compleja que puede ser expresada mediante:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' (F/m) \quad \text{Ecuación 24}$$

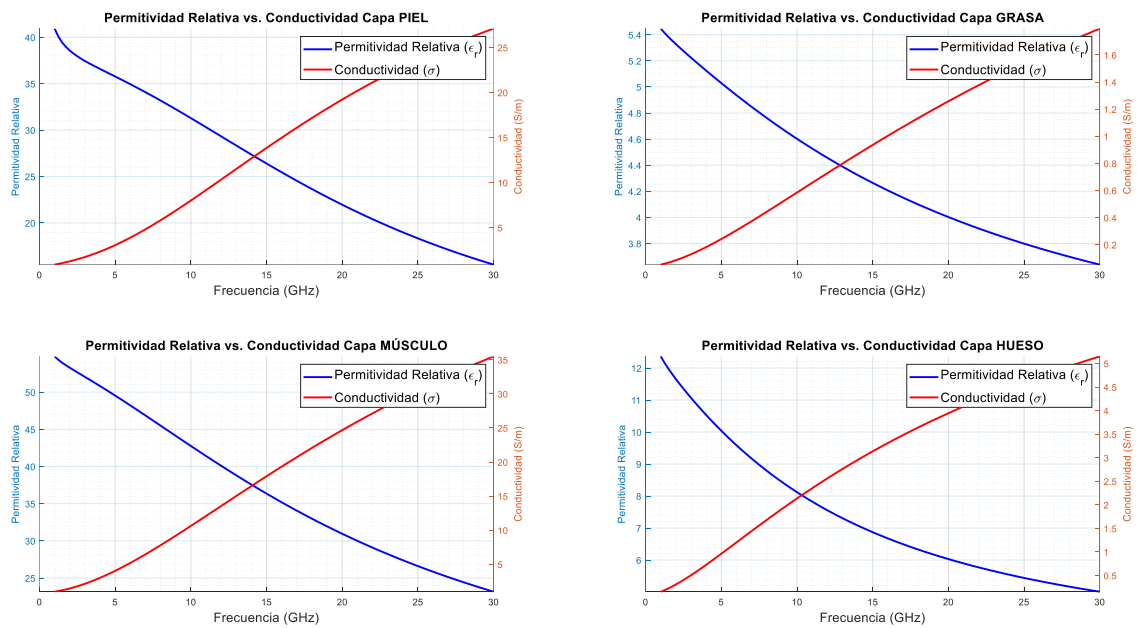
Esta última, es denominada permitividad dieléctrica compleja, en la cual la parte real representa el almacenamiento de energía en el material, mientras que la parte imaginaria (con signo contrario) representa la energía que se disipa o se pierde en el material. Tales pérdidas vienen definidas de la siguiente manera:

$$\tan(\delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon'} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde δ es el ángulo de pérdidas dieléctricas (rad.), σ es la conductividad del tejido (S/m), ω es la frecuencia angular de estudio (rad/s), ϵ' que hace referencia a $\epsilon'_r \epsilon_0$ y ϵ'' hace referencia a $\epsilon''_r \epsilon_0$.

Las simulaciones iniciales de permitividad y conductividad se encuentran basadas en los parámetros de las capas del cuerpo humano proporcionados en la base de datos de IT'IS FOUNDATION [36] que es una fundación de investigación independiente y sin fines de lucro dedicada a mejorar la calidad de vida de las personas en cuanto a seguridad y calidad en las tecnologías electromagnéticas emergentes.

Los parámetros de permitividad relativa y conductividad no tienen un valor constante: a medida que cambiamos de frecuencia cambian su valor. La variabilidad de dichos parámetros la podemos observar en la siguiente figura:



**Figura 4-1. Permitividades y Conductividades de las distintas capas analizadas:
A) Piel, B) Grasa, C) Músculo, D) Hueso.**

Seguidamente, se generan una serie de archivos en los cuales se guarde toda la información necesaria para poder lanzar las simulaciones del software. Recapitulados todos los datos anteriores, obtenemos el campo total existente en la superficie de cada capa, es decir:

$$\begin{aligned}
 E_{CAPA_N} &= E_{iCAPA_N} + E_{rCAPA_N} \\
 &= E_i(e^{-\gamma_{CAPA_N}z} + \rho_{CAPA_N}(z)e^{+\gamma_{CAPA_N}z}) \\
 &= E_i e^{-\gamma_{CAPA_N}z} (1 + \rho_{CAPA_N}(z)e^{+\gamma_{CAPA_N}z}) \text{ (V/m)}
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación 26}$$

donde γ hace referencia a la constante de propagación y ρ al coeficiente de reflexión.

A continuación, se presenta el escenario general de análisis:

CAPA 1 AIRE	CAPA 2 PIEL	CAPA 3 GRASA	CAPA 4 MÚSCULO	CAPA 5 HUESO	CAPA 6 HUESO	CAPA 7 AIRE
$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$
$\varepsilon_r = 1$	$\varepsilon_{r_{min}} = 15.51$ $\varepsilon_{r_{max}} = 40.94$	$\varepsilon_{r_{min}} = 3.64$ $\varepsilon_{r_{max}} = 5.45$	$\varepsilon_{r_{min}} = 23.16$ $\varepsilon_{r_{max}} = 54.81$	$\varepsilon_{r_{min}} = 5$ $\varepsilon_{r_{max}} = 12.36$	$\varepsilon_{r_{min}} = 5$ $\varepsilon_{r_{max}} = 12.36$	$\varepsilon_r = 1$
$\sigma = 0$ (S/m)	$\sigma_{min} = 0.89$ (S/m) $\sigma_{max} = 27.09$ (S/m)	$\sigma_{min} = 0.05$ (S/m) $\sigma_{max} = 1.79$ (S/m)	$\sigma_{min} = 0.97$ (S/m) $\sigma_{max} = 35.48$ (S/m)	$\sigma_{min} = 0.15$ (S/m) $\sigma_{max} = 5.15$ (S/m)	$\sigma_{min} = 0.15$ (S/m) $\sigma_{max} = 5.15$ (S/m)	$\sigma = 0$ (S/m)
$z = 0$	$z = 3$	$z = 11$	$z = 21$	$z = 27$	$z = 33$	

Figura 4-2. Distribución de capas a analizar.

Una vez obtenido el campo total de cada superficie, nos interesa saber la densidad de potencia de cada capa, para ello es necesario calcular la impedancia intrínseca de cada medio (η_{CAPA_N}).

A diferencia del medio aire, cuyo coeficiente de atenuación es cero y su impedancia intrínseca es 120π (Ω), pudiendo aproximarla a la impedancia del vacío, los demás medios tienen su propio valor de impedancia intrínseca diferente de la del vacío, ya que dependen tanto de la permitividad y la conductividad como de la frecuencia de análisis.

La impedancia intrínseca de cada medio viene dada por:

$$\eta_{CAPA_N} = \eta_0 \cdot \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}} \quad (\Omega) \quad \text{Ecuación 27}$$

donde η_0 es la impedancia intrínseca del vacío (Ω), ω es la frecuencia angular de estudio (rad/s), μ es la permeabilidad magnética del material bajo estudio (H/m), σ es la conductividad del material bajo estudio (S/m) y ε la permitividad del material bajo estudio.

Finalmente, como se ha comentado al inicio del presente capítulo, al encontrarnos en un modelo de onda plana incidente (E y H ortogonales) y teniendo todos los datos de campo eléctrico necesarios, se realiza el siguiente cálculo para obtener los valores correspondientes a la densidad de potencia:

$$P_{tx\ CAPA_N} = \frac{1}{2} \cdot |\vec{E}_{CAPA_N}|^2 \cdot \Re \left\{ \frac{1}{\eta_{CAPA_N}^*} \right\} \quad (W/m^2) \quad \text{Ecuación 28}$$

Una vez calculadas las diferentes potencias, se podrá averiguar el porcentaje de potencia disipada respecto a la capa 1:

$$P_{disCAPA_N} = \frac{P_{CAPA_1} - P_{CAPA_N}}{P_{CAPA_1}} \cdot 100\% \quad \text{Ecuación 29}$$

4.3 Caracterización de potencias absorbidas en tejidos humanos mediante el modelo de incidencia de onda plana

Para tener una mayor asertividad en la caracterización de potencia, se realizan **tres simulaciones extras** cuyos datos son procedentes de [37]–[39] a una frecuencia de 3.5GHz.

Esta frecuencia de estudio inicial es debida a que no se han podido encontrar estudios suficientes a una frecuencia de 3.7 GHz, por lo que, primero se quiere realizar una comparativa entre dichas fuentes y la base de datos perteneciente a IT'S FOUNDATION [36]. El objetivo es poder tener un respaldo de resultados que ofrezca una veracidad de la fuente [36] para posteriormente, en una segunda etapa de iteraciones en frecuencias mayores poder obtener datos de ella.

En el presente apartado se muestran los resultados de las diferentes simulaciones realizadas a través de parámetros pertenecientes de distintas fuentes [37]–[39]. Para exponer de manera más visual los resultados, se ha incluido en las figuras venideras una regresión exponencial que haga comprender cómo decae la potencia existente en cada capa del cuerpo humano. Por tanto, se realiza un estudio por capas del cuerpo humano al igual que T. Hamed [27].

4.3.1 Escenario 1

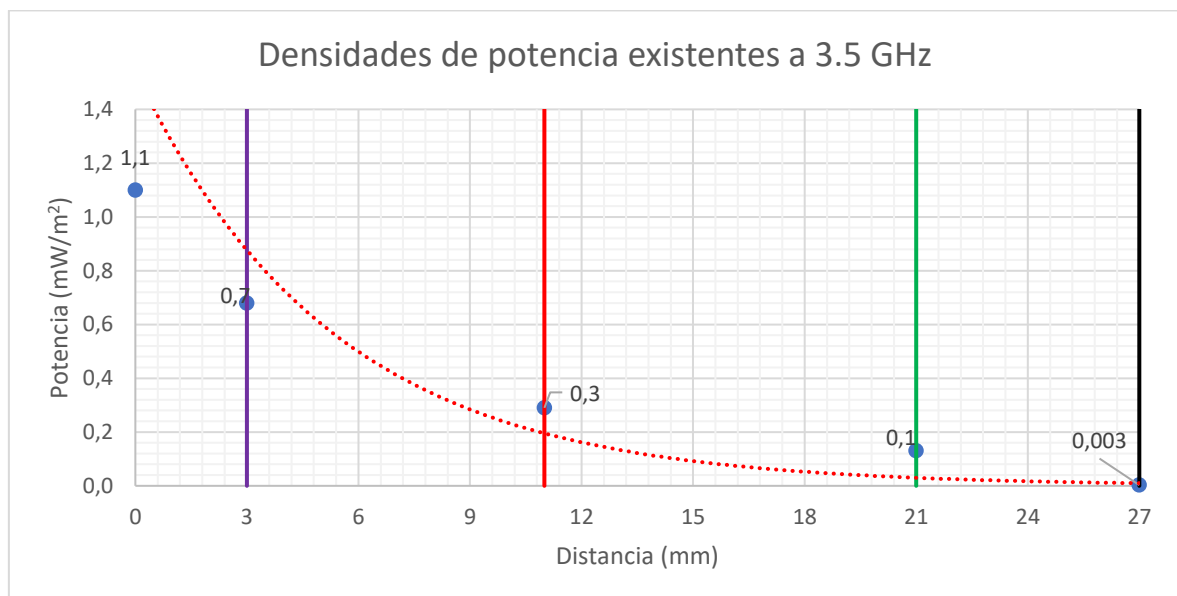


Figura 4-3. Densidad de potencia vs. Distancia a 3.5 GHz escenario 1

Por tanto, la disipación de potencia por capas calculada según la Ecuación 29 es la siguiente:

Tabla 4-1. Disipación de potencia en las capas (Escenario 1).

Interfaz entre Capas	Potencia disipada (%)
PIEL	36
GRASA	72
MÚSCULO	90
HUESO	99.7

4.3.2 Escenario 2

El segundo escenario de resultados tiene como base el artículo [37]. Los datos base utilizados del artículo nombrado son:

CAPA 1 AIRE	CAPA 2 PIEL	CAPA 3 GRASA	CAPA 4 MÚSCULO	CAPA 5 HUESO
$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$
$\varepsilon_r = 1$	$\varepsilon_r = 37$	$\varepsilon_r = 5.17$	$\varepsilon_r = 51.4$	$\varepsilon_r = 10.79$
$\sigma = 0$ (S/m)	$\sigma = 2.02$ (S/m)	$\sigma = 0.15$ (S/m)	$\sigma = 2.55$ (S/m)	$\sigma = 0.61$ (S/m)
$z = 0$	$z = 3$	$z = 11$	$z = 21$	$z = 27$

Z (mm)

Figura 4-4. Escenario 2.

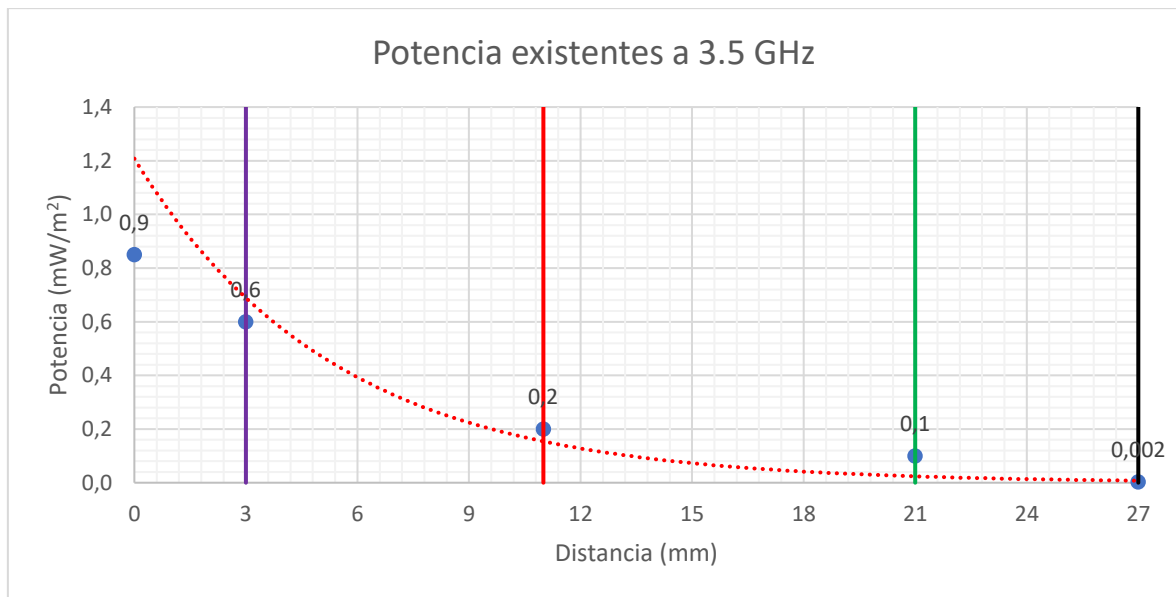


Figura 4-5. Potencia vs. Distancia a 3.5GHz escenario 2

Por tanto, la disipación de potencia por capas calculada según la Ecuación 29 es la siguiente:

Tabla 4-2. Disipación de potencia en las capas (Escenario 2).

Capas	Potencia disipada (%)
PIEL	30
GRASA	70
MÚSCULO	80
HUESO	99.7

4.3.3 Escenario 3

El tercer escenario de resultados tiene como base el artículo [38]. Los datos base utilizados del artículo nombrado son:

CAPA 1 AIRE	CAPA 2 PIEL	CAPA 3 GRASA	CAPA 4 MÚSCULO	CAPA 5 HUESO
$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$
$\varepsilon_r = 1$	$\varepsilon_r = 41$	$\varepsilon_r = 8.2$	$\varepsilon_r = 55$	$\varepsilon_r = 10.8$
$\sigma = 0$ (S/m)	$\sigma = 2$ (S/m)	$\sigma = 0.27$ (S/m)	$\sigma = 2.1$ (S/m)	$\sigma = 0.68$ (S/m)
$z = 0$	$z = 3$	$z = 11$	$z = 21$	$z = 27$

Z (mm)

Figura 4-6. Escenario 3.

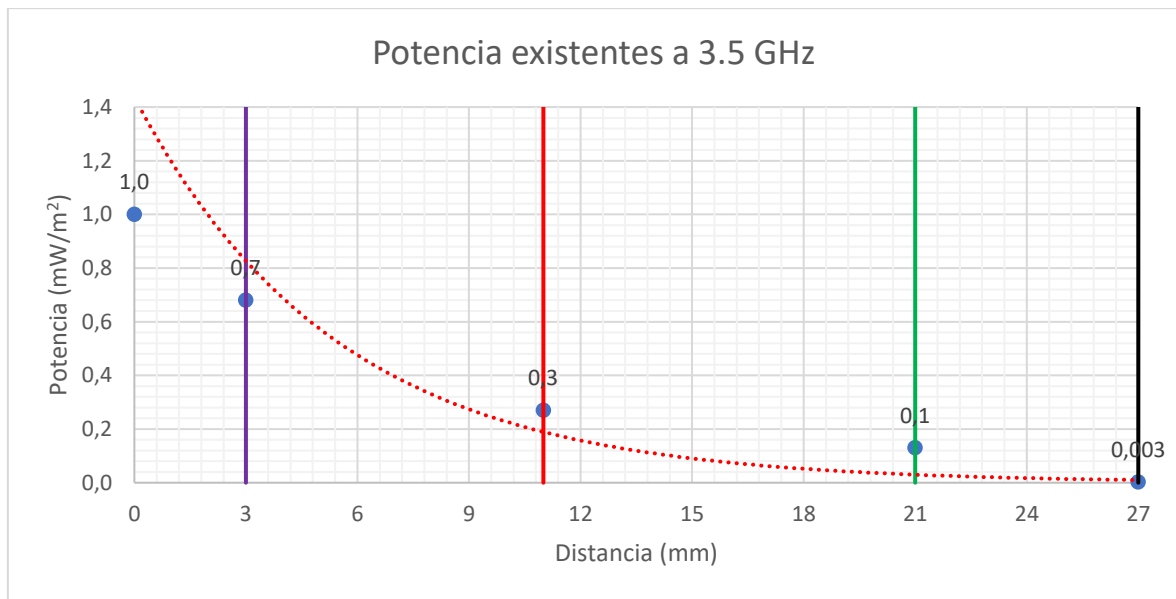


Figura 4-7. Potencia vs. Distancia a 3.5GHz escenario 3

Por tanto, la disipación de potencia por capas calculada según la Ecuación 29 es la siguiente:

Tabla 4-3. Disipación de potencia en las capas (Escenario 3).

Capas	Potencia disipada (%)
PIEL	30
GRASA	70
MÚSCULO	80
HUESO	99.7

4.3.4 Escenario 4

El cuarto escenario de resultados tiene como base el artículo [39]. Los datos base utilizados del artículo nombrado son:

CAPA 1 AIRE	CAPA 2 PIEL	CAPA 3 GRASA	CAPA 4 MÚSCULO	CAPA 5 HUESO
$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$
$\varepsilon_r = 1$	$\varepsilon_r = 37$	$\varepsilon_r = 5.2$	$\varepsilon_r = 51.4$	$\varepsilon_r = 10.79$
$\sigma = 0$ (S/m)	$\sigma = 2.02$ (S/m)	$\sigma = 0.16$ (S/m)	$\sigma = 2.6$ (S/m)	$\sigma = 0.61$ (S/m)
$z = 0$	$z = 3$	$z = 11$	$z = 21$	$z = 27$

Z (mm)

Figura 4-8. Escenario 3.

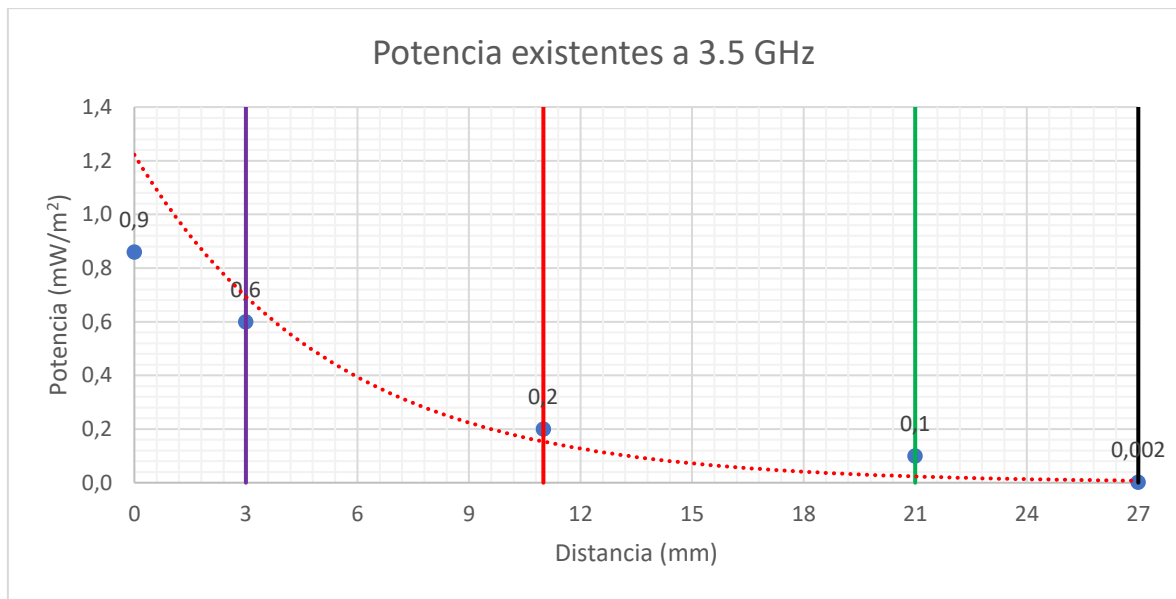


Figura 4-9. Potencia vs. Distancia a 3.5GHz escenario 4

Por tanto, la disipación de potencia por capas calculada según la Ecuación 29 es la siguiente:

Tabla 4-4. Disipación de potencia en las capas (Escenario 4).

Capas	Potencia disipada (%)
PIEL	30
GRASA	70
MÚSCULO	80
HUESO	99.7

4.3.5 Discusión de resultados

Analizados los cuatro escenarios anteriores, se puede observar, como se ha comentado anteriormente, que la potencia se disipa cada vez más a medida que la distancia de penetración es mayor.

Por lo que, si se realiza una media de la potencia disipada en los 4 escenarios bajo estudio a la frecuencia de análisis, se obtiene:

Tabla 4-5. Disipación media de potencia vs disipación de potencia en escenarios 1 a 3.5 GHz.

Capa	Potencia media disipada (%)	Potencia disipada escenario 1 (%)
PIEL	31.5	36
GRASA	70.5	72
MÚSCULO	82.5	90
HUESO	99.7	99.7

Por tanto, observando los resultados de la tabla anterior, los datos son similares a los que han sido conseguidos en el escenario 1, en el cual los datos son extraídos de [36]. Por lo que, se podría decir que los datos de [36] son correctos y confiables para una nueva iteración de simulaciones a frecuencias mayores.

Finalmente, a través de los resultados obtenidos, si realizamos una comparativa con el modelo realista estudiado en el capítulo anterior, la Figura 3-13 nos ofrecía una visual en la que el SAR decaía de manera extrapolable a una función exponencial, algo similar a lo que hemos podido observar a lo largo de las simulaciones de incidencia de onda plana anteriores con la densidad de potencia.

4.4 Resultados a 3.7 y 26 GHz

4.4.1 Análisis a 3.7 GHz

CAPA 1 AIRE	CAPA 2 PIEL	CAPA 3 GRASA	CAPA 4 MÚSCULO	CAPA 5 HUESO
$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$	$\mu = 1$
$\varepsilon_r = 1$	$\varepsilon_r = 36.8$	$\varepsilon_r = 5.15$	$\varepsilon_r = 51.2$	$\varepsilon_r = 10.7$
$\sigma = 0$ (S/m)	$\sigma = 2.5$ (S/m)	$\sigma = 0.17$ (S/m)	$\sigma = 2.74$ (S/m)	$\sigma = 0.66$ (S/m)
$z = 0$	$z = 3$	$z = 11$	$z = 21$	$z = 27$

Z (mm)

Figura 4-10. Escenario 1 a 3.7 GHz.

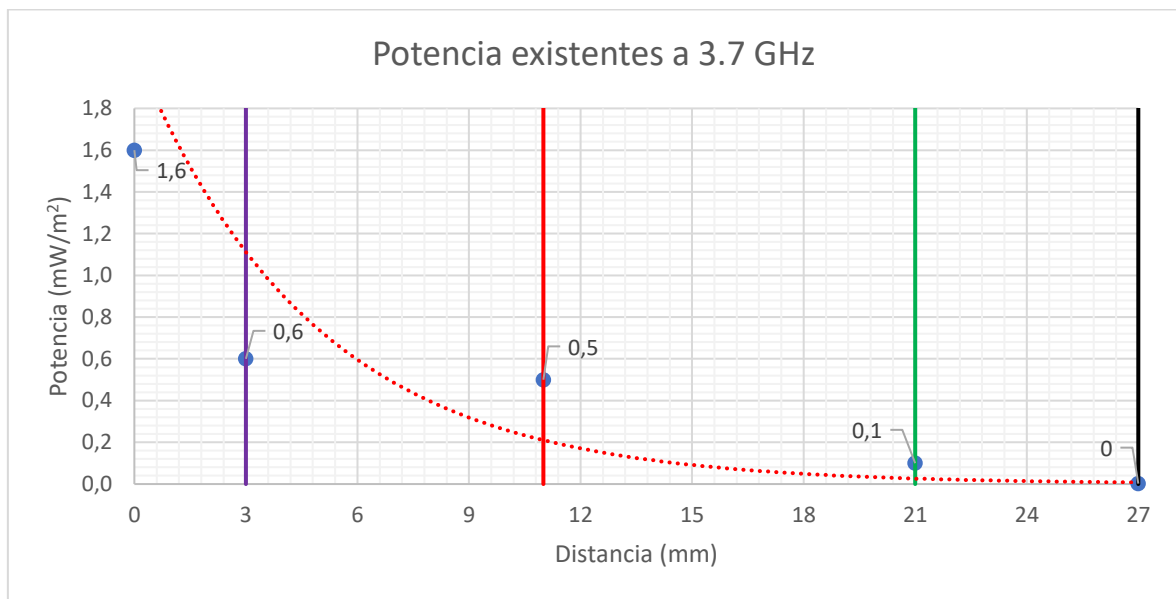


Figura 4-11. Potencia vs. Distancia a 3.7GHz

Por tanto, la disipación de potencia por capas calculada según la Ecuación 29 es la siguiente:

Tabla 4-6. Disipación de potencia en las capas a 3.7 GHz

Capas	Potencia disipada (%)
PIEL	62.5
GRASA	68.8
MÚSCULO	93.7
HUESO	100

4.4.2 Análisis a 26 GHz

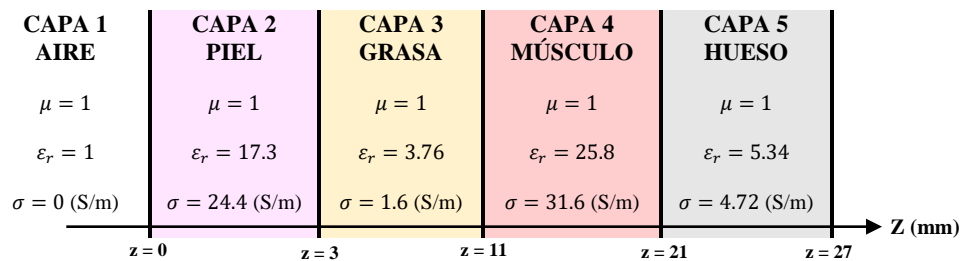


Figura 4-12. Escenario 2 a 26 GHz.

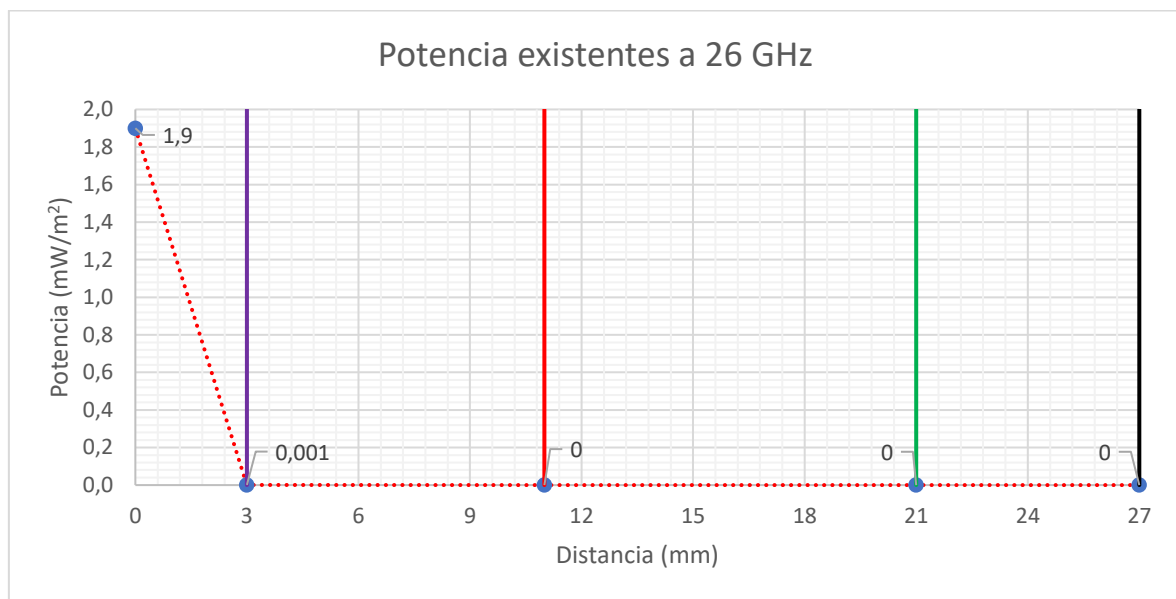


Figura 4-13. Potencia vs. Distancia a 26 GHz

Por tanto, la disipación de potencia por capas calculada según la Ecuación 29 es la siguiente:

Tabla 4-7. Disipación de potencia en las capas a 26 GHz

Capas	Potencia disipada (%)
PIEL	99.9
GRASA	100

4.5 Discusión de resultados

Inicialmente se han simulado cuatro escenarios a través de los cuales se ha comprobado cómo la potencia decae a medida que la penetración en el cuerpo humano es mayor. Seguidamente, se ha verificado que [36] es una base confiable para poder realizar simulaciones a frecuencias mayores dependiendo únicamente de los parámetros que nos ofrece. Una vez verificado esto, se ha podido ver que el simple hecho de subir en frecuencia afecta en gran medida a la disipación, ya que hemos pasado de una disipación de casi un 32% a casi el doble.

Por tanto, una característica muy importante que se debe señalar es que no solo la penetración en el cuerpo humano afecta a la disipación de la densidad de potencia, sino que, a su vez, el hecho de trabajar en frecuencias muy altas consigue que la potencia casi en su totalidad se disipe en la capa de la piel.

4.6 Caracterización de potencia de la Capa PIEL

En el presente apartado se procede a realizar un segundo análisis referente al comportamiento del cuerpo frente a la exposición EM. Como se ha podido apreciar en los resultados obtenidos de la sección anterior, gran parte de la potencia es disipada en el momento que entra en contacto con la piel humana.

Como se ha comentado en la sección Caracterización de la exposición electromagnética en ondas en alta frecuencia, uno de los objetivos del presente trabajo es poder ofrecer un análisis de la capa en la cual la caída de potencia es más considerable. Es por ello que nace la necesidad de analizar en qué punto de profundidad de la piel humana ocurre este fenómeno.

4.6.1 Hipótesis de estudio

La estructura general de la piel humana se encuentra formada por la epidermis, dermis e hipodermis (Figura 4-14).

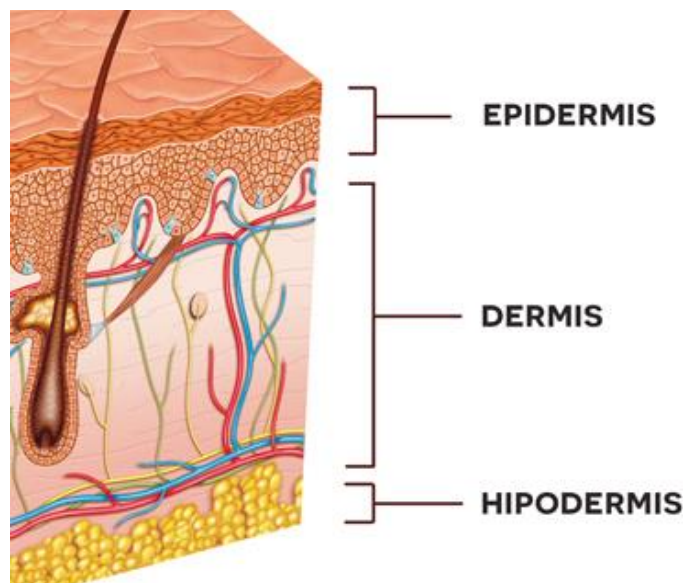


Figura 4-14. Estructura general de la piel humana [40].

Para poder realizar las simulaciones, es necesario obtener los parámetros de permitividad y conductividad referente a cada uno de los diferentes tejidos que forman la piel. Por un lado, se parte de la hipótesis aconsejada⁷ que se basa en la que la estructura de la piel humana tiene una estructura similar a la porcina. Existen estudios que corroboran esta teoría [41]. Por otra parte, el artículo [42] realiza un estudio de las propiedades dieléctricas tanto de la epidermis como de la dermis porcina en un rango de frecuencias amplio.

Por ello las propiedades dieléctricas de ambos tejidos nombrados serán extraídas de este estudio, esto se realiza debido a que no se han encontrado valores referentes a la piel humana. Finalmente, se ha seguido nuevamente el consejo⁷ de tomar el último tejido de la estructura (hipodermis) como un tejido graso; por tanto, sus propiedades dieléctricas podrán ser extraídas de [36].

4.6.2 Análisis de la Piel

A continuación, se presenta el escenario de análisis:

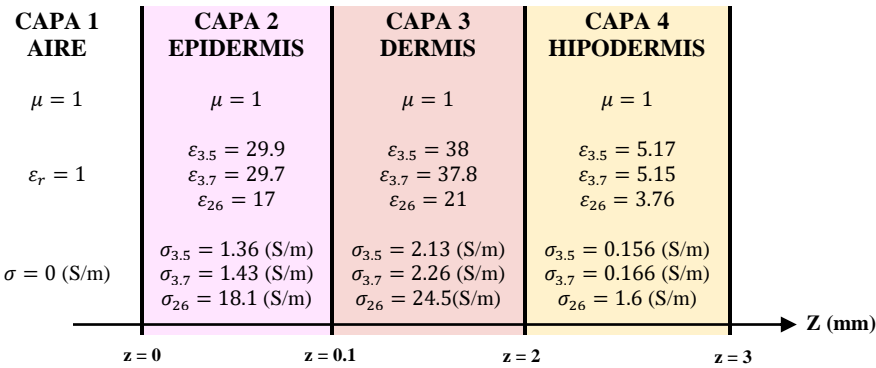


Figura 4-15. Análisis de la piel.

En la figura anterior se puede observar los datos dieléctricos a utilizar en la presente simulación. Se puede apreciar que los datos de la epidermis y dermis son muy similares a los que podemos encontrar en la capa piel.

Otro punto importante a la hora de apreciar dichos parámetros debía ser que la epidermis ha de tener valores de permitividad y conductividad menores que la dermis, debido a su mayor porcentaje de agua.

⁷ Pre-Doctoral en Neurociencias – Marlene Soledad Beccari Galeano

A continuación, en las figuras siguientes se indica la potencia existente en cada interfaz de las anteriormente nombradas; junto a esta información se ofrece nuevamente una regresión exponencial de los puntos obtenidos como resultados de las simulaciones con el objetivo de comprender mejor los resultados conseguidos.

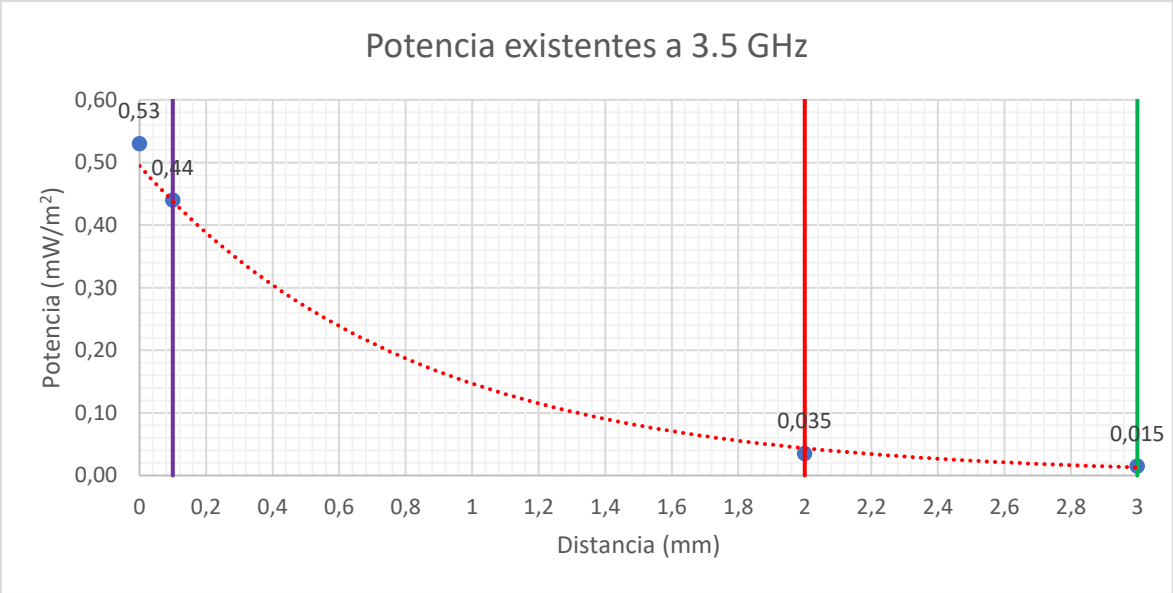


Figura 4-16. Potencia vs. Distancia en la capa piel a 3.5 GHz.

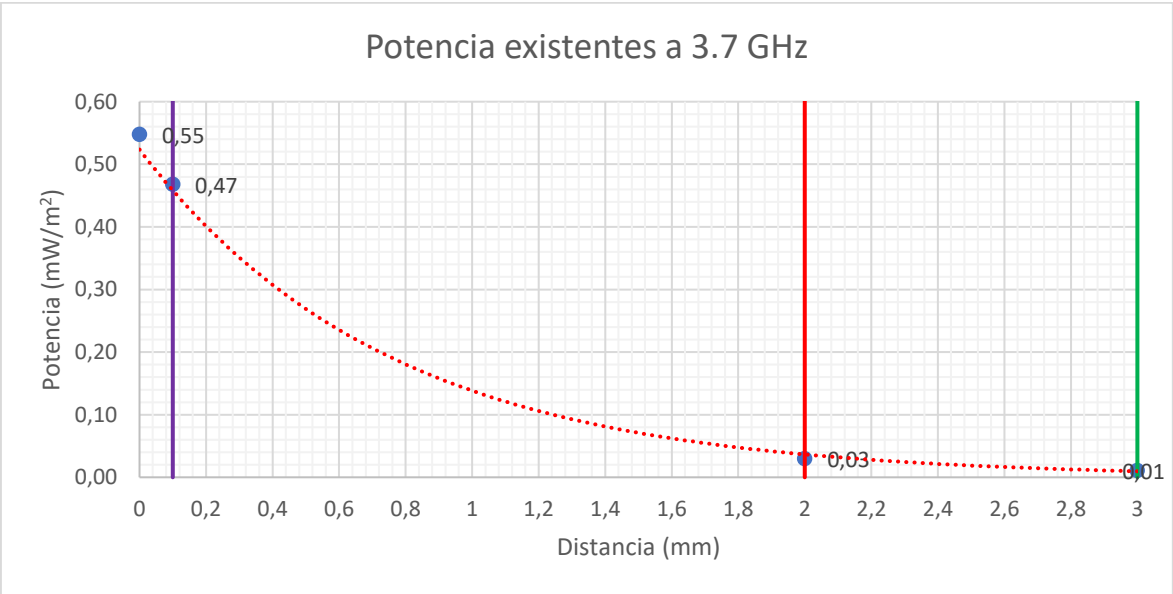


Figura 4-17. Potencia vs. Distancia en la capa piel a 3.7 GHz.

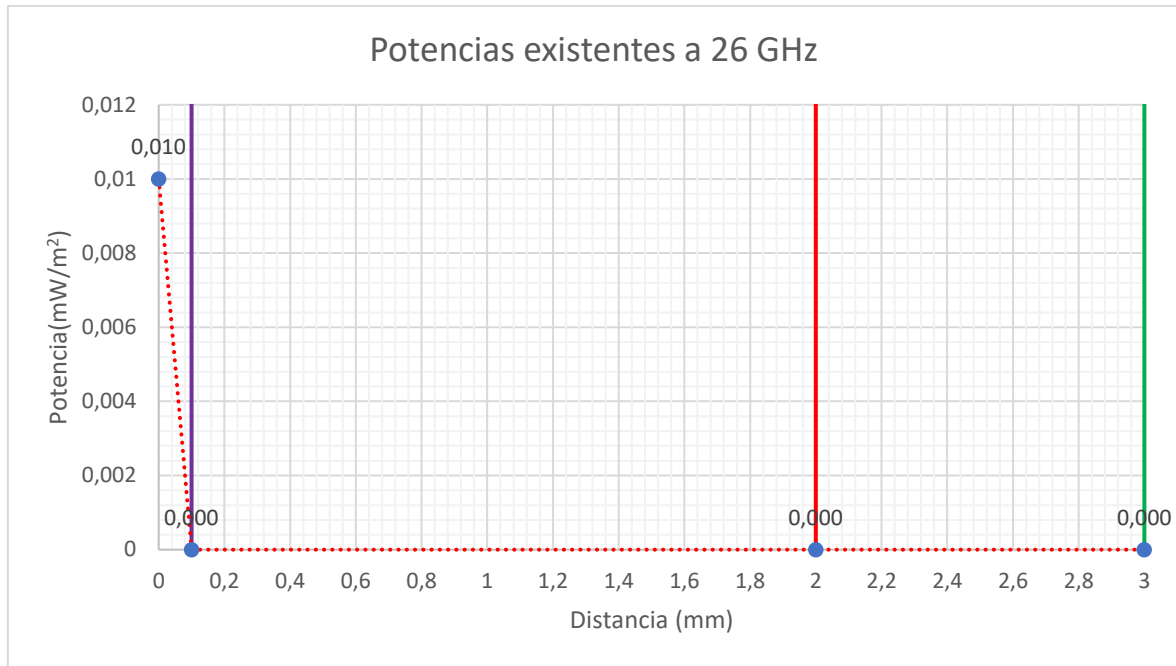


Figura 4-18. Potencia vs. Distancia en la capa piel a 26 GHz.

4.6.3 Discusión de resultados

Inicialmente, en la sección anterior se han simulado varios escenarios pudiendo concluir que gran parte de la potencia que penetra en el cuerpo humano es disipada en la capa de la piel. Con el objetivo de aportar mayor detalle a esta conclusión, se ha partido de una serie de hipótesis que permitían dividir la capa de la piel en subcapas y poder obtener sus parámetros dieléctricos necesarios para el análisis.

Realizado el análisis podemos observar que la mayor parte de la potencia es disipada en la capa de la dermis (aprox. 75%). Sin embargo, si subimos en frecuencia como ocurre en 26 GHz, la potencia se disipa en su totalidad en la epidermis.

Para incidir aún más en esta idea, a continuación se presenta el escenario de análisis a una frecuencia de 60 GHz, que es una de las frecuencias que se consideran en un futuro más lejano para seguir implantando y desarrollando el 5G [42]. En este escenario se observa que la densidad de potencia que penetra más allá la epidermis es prácticamente nula, disipándose en su totalidad en dicha epidermis:

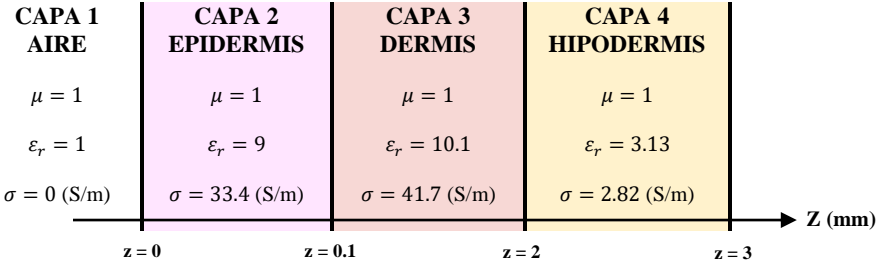


Figura 4-19. Análisis de la piel.

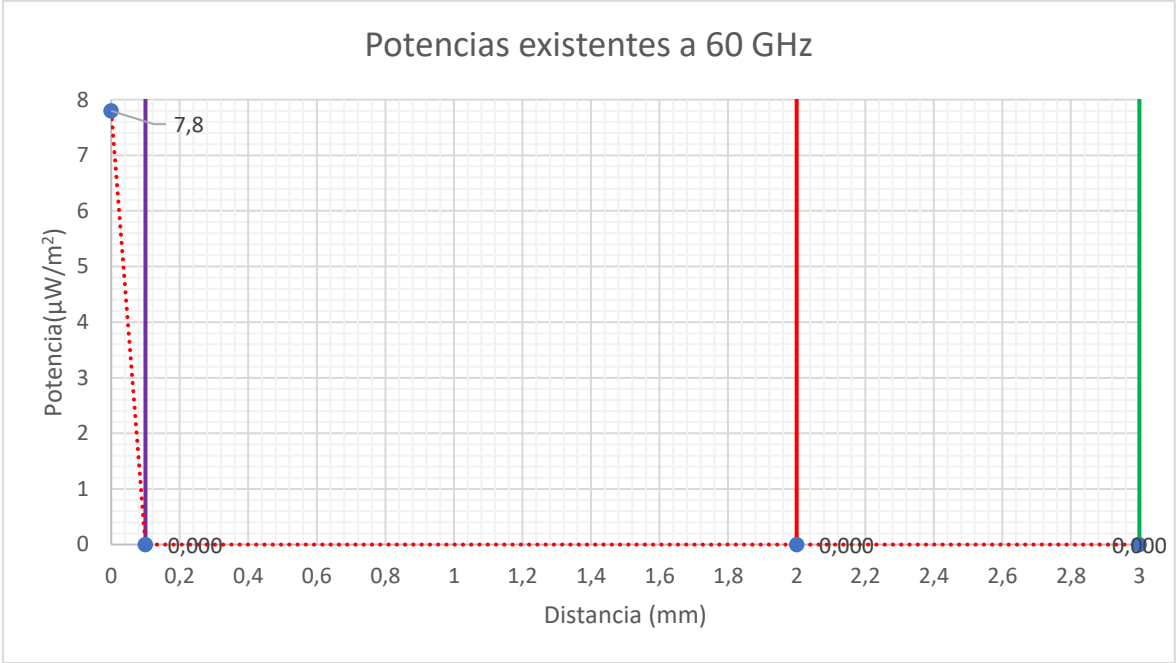


Figura 4-20. Potencia vs. Distancia en la capa piel a 26 GHz.

5 Conclusiones

En este apartado se describirán brevemente las conclusiones del trabajo realizado.

Los sistemas 5G futuros utilizarán las bandas de frecuencia de 3.5, 3.7 y 26 GHz respectivamente en España. Existen rigurosas y estrictas regulaciones sobre la potencia máxima que pueden emitir afectando por igual a todos aquellos dispositivos que utilicen dichas frecuencias.

Con el objetivo de cuantificar la exposición electromagnética (EM) que afecta a las personas usuarias de dicha tecnología, se ha propuesto una metodología con dos partes bien diferenciadas.

Por un lado, a través de las simulaciones en la región de campo cercano, se ha comprobado si los límites de exposición electromagnética (EM) no son superados mediante una antena diseñada y simulada para el presente trabajo. Para ello, se ha radiado a una potencia de 23 dBm y 26 dBm, y se ha comprobado que los límites de SAR (W/kg) se encuentran aún por encima con una antena en tecnología microstrip, ya que con un dipolo a la frecuencia analizada (3.7 GHz) en cuando llegamos a 26 dBm sobrepasa los límites en 1W/kg.

Seguidamente, se ha conseguido ofrecer una visión del decaimiento del SAR (W/kg) en función a la distancia (mm) y se ha podido observar como este parámetro disminuye de manera exponencial. A continuación, se ha ofrecido un cálculo de la potencia máxima transmitida a cumplir por un dispositivo móvil en límites de SAR (*Low-power exclusion level*).

Por otra parte, realizando un modelo de capas del cuerpo humano con un modelo de incidencia de onda plana se ha distinguido, por un lado, el nivel de potencia existente en las diferentes delimitaciones de capas del cuerpo humano, realizando especial hincapié en aquella en la cual se observaba una pérdida de potencia que ronda el 31%, en este caso la piel a una frecuencia de trabajo de 3.5 GHz.

Seguidamente, se ha podido observar que el simple hecho de aumentar en frecuencia las pérdidas observadas en esta capa (capa piel) aumentan de manera considerable (casi al doble), por lo que se justifica uno de los objetivos del presente trabajo que consiste en realizar la caracterización de la misma de manera individualizada una vez definidas y caracterizadas las subcapas que la forman.

Por ello, se prosiguió realizando un modelo más realista de la capa anteriormente nombrada (capa piel). Realizadas las simulaciones se consiguió determinar un comportamiento similar al visto cuando teníamos presente todas las capas del cuerpo humano. Llegando al punto en el cual podemos decir que para la frecuencia de trabajo mayor (26 y 60 GHz) la potencia en su totalidad es perdida en la epidermis.

Por tanto, figuras de mérito volumétricas utilizadas tradicionalmente en frecuencias más bajas, como la SAR, pueden no ser tan útiles a frecuencias altas, donde la potencia no se disipa en un volumen con una masa asociada, sino principalmente en la piel (epidermis), lo que sugiere la idoneidad de otras figuras de mérito asociadas directamente a la densidad de potencia, tal y como se expone en [43].

Referencias

- [1] E. G. Cuasimodo, «Los estudios científicos que confrontan los efectos sobre la salud de los móviles y el wifi», *20 minutos*, 2017. <https://www.20minutos.es/noticia/3005030/0/posibles-efectos-sobre-la-salud-de-los-telefonos-moviles/> (accedido abr. 20, 2020).
- [2] J. C. R., «Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones», sep. 2001. Accedido: abr. 22, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2001/09/29/pdfs/A36217-36227.pdf>.
- [3] E. R. Galeano Portalea y D. Pereda Guerra, «TRABAJO FIN DE GRADO CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO APANTALLADOR DE LOS TEXTILES FRENTE A LA EXPOSICIÓN ELECTROMAGNÉTICA DEBIDA AL SISTEMA DE COMUNICACIONES BLUETOOTH», Bilbao, jun. 2018. Accedido: jul. 08, 2020. [En línea]. Disponible en: https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/29239/TFG_RodrigoEzequielPortalea.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [4] Lou Frenzel, «What's The Difference Between EM Near Field And Far Field?», jun. 2012. Accedido: abr. 24, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.electronicdesign.com/markets/energy/article/21801976/whats-the-difference-between-em-near-field-and-far-field>.
- [5] M. Ángel, S. Vérez, y J. Sáiz Ipiña, «CONCEPTOS BÁSICOS DE BIOELECTROMAGNETISMO UNIVERSIDAD DE CANTABRIA Grupo de Electromagnetismo AUTORES». Accedido: ago. 17, 2020. [En línea]. Disponible en: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1926/course/section/2221/apuntes_1.pdf.
- [6] A. Agarwal, K. Agarwal, S. Agarwal, y G. Misra, «Evolution of Mobile Communication Technology towards 5G Networks and Challenges», *Am. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 7, n.º 2, pp. 34-37, 2019, doi: 10.12691/ajeee-7-2-2.
- [7] D. Delgado Dotor y J. Lopez Vicario, «Evaluación de redes móviles 5G en entornos con aplicaciones IoT», ene. 2020. Accedido: jul. 08, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/106667/6/daviddddTFM0120 memoria.pdf>.
- [8] «ITU News Magazine », 2017. Accedido: jul. 18, 2020. [En línea]. Disponible en: www.spectrum-summit.com.
- [9] Gemalto, «Presentando la tecnología y redes 5G (definición, características, 5G vs 4G y casos de uso)», nov. 12, 2019. <https://www.gemalto.com/latam/telecom/inspiracion/5g> (accedido abr. 22, 2020).
- [10] «5G and EMF Explained». Accedido: jul. 20, 2020. [En línea]. Disponible en: http://www.emfexplained.info/site/misc/emf/downloads/5G&EMF_Explained_Genric_ES_16March_2020.pdf.
- [11] « MIMO masivo». Accedido: jul. 20, 2020. [En línea]. Disponible en: https://cdn.rohde-schwarz.com/magazine/pdfs_1/article/221/spanish_23/NEWS_221__02_MIMO-Kompendum__ES.pdf.
- [12] «Arquitectura de las redes 5G». <https://www.viavisolutions.com/es-es/arquitectura-de-la-tecnologia-5g> (accedido jul. 20, 2020).

- [13] S. Chakraborty *et al.*, «A 4-element MIMO antenna with orthogonal circular polarization for sub-6 GHz 5G cellular applications», 123d. C., doi: 10.1007/s42452-020-2957-z.
- [14] RADIO SPECTRUM POLICY GROUP, «STRATEGIC ROADMAP TOWARDS 5G FOR EUROPE Opinion on spectrum related aspects for next-generation wireless systems (5G)», Bruselas, nov. 2016. Accedido: abr. 22, 2020. [En línea]. Disponible en: https://rspg-spectrum.eu/wp-content/uploads/2013/05/RPSG16-032-Opinion_5G.pdf.
- [15] RADIO SPECTRUM POLICY GROUP, «RSPG18-005 FINAL -- STRATEGIC SPECTRUM ROADMAP TOWARDS 5G FOR EUROPE RSPG Second Opinion on 5G networks RSPG18-005 FINAL 2 RSPG Second Opinion on 5G networks», Bruselas, ene. 2018. Accedido: abr. 22, 2020. [En línea]. Disponible en: https://circabc.europa.eu/sd/a/fe1a3338-b751-43e3-9ed8-a5632f051d1f/RSPG18-005final-2nd_opinion_on_5G.pdf.
- [16] SECRETARÍA DE ESTADO PARA LA SOCIEDAD DE LA Y INFORMACIÓN Y LA AGENDA DIGITAL, «Plan Nacional 5G», 2018. Accedido: abr. 24, 2020. [En línea]. Disponible en: https://avancedigital.gob.es/5G/Documents/plan_nacional_5g.pdf.
- [17] M. R. Abascal, R. María, G. Alonso, J. R. Grau, J. José, y C. Castro, «DIRECCIÓN DE LOS ESTUDIOS Director Técnico». Accedido: jul. 19, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.alcobendas.org/recursos/doc/Urbanismo_infraestructura/Informes_medioambientales/307953832_311201413357.pdf.
- [18] B. Knave y K. H. Mild, «Radiaciones no Ionizantes», sep. . Accedido: abr. 24, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/162520/Capítulo+49.+Radiaciones+no+ionizantes>.
- [19] *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de la exposición a campos electromagnéticos en los lugares de trabajo. .*
- [20] «OMS | ¿Qué son los campos electromagnéticos?» <https://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/es/index1.html> (accedido jul. 06, 2020).
- [21] A. Fustel, E. Garcia Vázquez, y R. O. Olalde, «CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS Y EFECTOS EN SALUD», 2011. Accedido: jul. 21, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/salud_amb_campos_electrom/es_def/adjuntos/CEM_cast.pdf.
- [22] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, «GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO ELECTROMAGNETIC FIELDS (100 KHZ TO 300 GHZ) », ICNIRP, mar. 2020. doi: 10.1097/HP.0000000000001210.
- [23] «Specific Absorption Rate (SAR) for Cellular Telephones | Federal Communications Commission». <https://www.fcc.gov/general/specific-absorption-rate-sar-cellular-telephones> (accedido jul. 21, 2020).
- [24] M.-O. Mattsson, A. Ahlbom, y J. Bridges, «Health Effects of Exposure to EMF», 2009. Accedido: jul. 22, 2020. [En línea]. Disponible en: http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_mi_023.pdf.
- [25] BNN Communication Engineers, «BNN Communication Engineers». https://www.bnncom.com/products_page.py?title=cDASY6 (accedido abr. 24, 2020).

- [26] Schmid & Partner Engineering AG, «DASY6 Systems». <https://speag.swiss/products/dasy6/overview/> (accedido abr. 24, 2020).
- [27] T. Hamed y M. Maqsood, «SAR Calculation & Temperature Response of Human Body Exposure to Electromagnetic Radiations at 28, 40 and 60 GHz mmWave Frequencies», 2018. Accedido: jul. 19, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.jpier.org/PIERM/pierm73/06.18061102.pdf>.
- [28] K. H. Lee, I. Ahmed, R. S. M. Goh, E. H. Khoo, E. P. Li, y T. G. G. Hung, «Implementation of the FDTD method based on Lorentz-Drude dispersive model on GPU for plasmonics applications», *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 116, pp. 441-456, 2011, doi: 10.2528/PIER11042002.
- [29] M. Izadi, M. Z. A. Ab Kadir, y C. Gomes, «Evaluation of electromagnetic fields associated with inclined lightning channel using second order FDTD-hybrid methods», *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 117, pp. 209-236, 2011, doi: 10.2528/PIER11042103.
- [30] European Telecommunications Standards Institute, «User Equipment (UE) radio transmission and reception», 2018. Accedido: ago. 22, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/13810101/15.02.00_60/ts_13810101v150200p.pdf.
- [31] IEEE, *INTERNATIONAL STANDARD Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30 MHz to 6 GHz-Part 1: General requirements for using the finite-difference time-domain (FDTD) method for SAR calculations INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION*. 2017.
- [32] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, Third Edition. .
- [33] *About the IEC About IEC publications*. 2010.
- [34] «Bienvenido a RFCAS | RFCAS». <http://rfcas.eps.uam.es/web/> (accedido jul. 19, 2020).
- [35] M. Riquelme Pinar, «Caracterización de radiación no ionizante en el Campus de Terrassa de la UPC», Universitat Politècnica de Catalunya, may 2016. Accedido: ago. 12, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/88871>.
- [36] «Dielectric Properties» IT'IS Foundation». <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties/> (accedido ago. 05, 2020).
- [37] C. Gabriel, «COMPILATION OF THE DIELECTRIC PROPERTIES OF BODY TISSUES AT RF AND MICROWAVE FREQUENCIES», 1996. Accedido: ago. 05, 2020. [En línea]. Disponible en: https://pdfs.semanticscholar.org/6de1/49eb3f64b7341e832023c3bf2a6eac3c8ed0.pdf?_ga=2.107596998.5983898.1591291871-129671950.1590887575.
- [38] S. Gabriel, R. W. Lau, y C. Gabriel, «The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz», 1996. Accedido: ago. 05, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9155/41/11/002/pdf>.
- [39] M. El Atrash, M. A. Abdalla, y H. M. Elhennawy, «A Wearable Dual-Band Low Profile High Gain Low SAR Antenna AMC-Backed for WBAN Applications», *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 67, n.º 10, pp. 6378-6388, oct. 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2923058.
- [40] R. M., «Nuestra piel se comunica con nosotros: Descodificación Biológica | Memoria Emocional». <https://memoriaemocional.com/piel-descodificando-problemas/> (accedido ago. 04, 2020).

- [41] R. Neupane, S. H. S. Boddu, J. Renukuntla, R. Jayachandra Babu, y A. K. Tiwari, «Alternatives to Biological Skin in Permeation Studies: Current Trends and Possibilities», doi: 10.3390/pharmaceutics12020152.
- [42] K. Sasaki, K. Wake, y S. Watanabe, «Measurement of the dielectric properties of the epidermis and dermis at frequencies from 0.5 GHz to 110 GHz», *Phys. Med. Biol. Phys. Med. Biol*, vol. 59, pp. 4739-4747, 2014, doi: 10.1088/0031-9155/59/16/4739.
- [43] A. R. Guraliuc, M. Zhadobov, R. Sauleau, L. Marnat, y L. Dussopt, «Near-Field User Exposure in Forthcoming 5G Scenarios in the 60 GHz Band», *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, n.º 12, pp. 6606-6615, dic. 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2754473.
- [44] Comité Científico Asesor en Radiofrecuencia y Salud, «La ICNIRP actualiza las directrices que determinan los límites de exposición a los campos electromagnéticos». <http://ccars.org.es/noticias-home/noticias-sobre-radiofrecuencia-y-salud/237-la-icnirp-actualiza-las-directrices-que-determinan-los-limites-de-exposicion-a-los-campos-electromagneticos> (accedido abr. 24, 2020).

Glosario

5G	Quinta Generación
OMS	Organización Mundial de la Salud
CEM	Campos Electromagnéticos
RF	Radiofrecuencia
CST MWS	CST MicroWave Studio
IoT	Internet of Things
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
RSPG	Radio Spectrum Policy Group
EM	Electromagnética
RI	Radiación Ionizante
RNI	Radiación No Ionizante
SAR	Specific Absorption Rate
FCC	Federal Communications Commission
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
RFCAS	Radio Frecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas